

Grado Universitario en Ingeniería Mecánica
2016-2017

Trabajo Fin de Grado

“Estudio y análisis de la transferencia de calor en una ventana con cavidad interior”

Jorge Muñoz Gómez

Tutor

Luis Miguel García Gutiérrez

Leganés, septiembre 2017



[Incluir en el caso del interés de su publicación en el archivo abierto]

Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**

Resumen.

Debido a la importancia económica y ambiental en la pérdida de calor de una vivienda cuando se pretende mantener esta a una temperatura adecuada para la estancia, surge la idea de realizar un estudio de la transferencia de calor a través de una ventana, pues debido a sus características, es la zona por la que más energía se pierde siendo considerado su tamaño. La ventana estudiada es de doble acristalamiento con gas en la cavidad interior, pues son las más utilizadas en el mercado y las más eficientes, también permite el estudio de la influencia y comportamiento de dicho gas encerrado.

Se consiguen los valores de los parámetros necesarios para conocer el flujo de calor que pasa a través de los cristales, como los coeficientes de convección o la transmitancia térmica de la ventana. Estos resultados se determinan para diferentes condiciones exteriores o configuraciones del gas y los vidrios para conocer su influencia térmica sobre el conjunto de la ventana.

Con los datos y soluciones conocidos, se realiza un estudio sobre la distribución longitudinal de temperatura en el centro de la ventana interior. Con apoyo de la literatura utilizada, se obtiene una expresión para la convección interior del gas que permite el cálculo de dicha temperatura, comprobando cómo en la zona superior es mayor que en la inferior.

Palabras clave: Transferencia de calor, ventana con cavidad, condensación, convección natural en cavidad y distribución de temperatura.

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción	9
1.1. Motivación	9
1.2. Objetivos.....	12
1.3. Fases de desarrollo.....	13
1.4. Medios empleados	14
1.5. Marco regulador.....	15
2. Estado del arte	16
2.1. Transferencia de calor en ventanas	16
2.1.1. Convección.....	16
2.1.4. Conducción.....	18
2.1.5. Radiación.....	18
2.2. Tipos de cerramientos	19
2.3. Propiedades de los gases.....	20
2.3.1. Viscosidad dinámica (μ).....	21
2.3.2. Viscosidad cinemática (ν).....	21
2.3.3. Densidad (ρ)	21
2.3.4. Coeficiente de expansión volumétrica (β)	22
2.3.5. Difusividad térmica (α)	22
2.3.6. Conductividad térmica (k).....	22
2.3.7. Transmitancia térmica (U_{ref}).....	22
2.3.8. Número de Prandtl (Pr)	23
2.3.9. Capa límite térmica.....	23
2.4. Física del problema	24
2.4.1. Transferencia de calor en el interior de la vivienda.....	25
2.4.2. Transferencia de calor en el ambiente exterior.....	25

2.4.3.	Transferencia de calor en la cavidad interior.....	26
3.	Planteamiento del problema.....	28
3.1.	Medidas experimentales de temperatura.....	28
3.2.	Modelo físico para la obtención de la expresión final de la temperatura.	31
3.2.1.	Expresión del espesor de la capa límite térmica.....	31
3.2.2.	Expresión de la temperatura.	34
4.	Modelo numérico	40
4.1.	Ambientes exterior e interior	41
4.2.	Acristalamiento	41
4.3.	Gas en la cavidad.	42
5.	Resultados	43
5.1	Flujo de calor constante.	43
5.1.1	Resultados iniciales.	43
5.1.2.	Coeficientes de transferencia de calor por convección	44
5.1.3.	Cálculo de las constantes c y m	46
5.1.4.	Cálculo de la distribución longitudinal de temperatura.....	48
5.2.	Temperatura de la superficie uniforme.....	50
5.2.1	Resultados iniciales.	50
5.2.2.	Coeficientes de transferencia de calor por convección	51
5.2.3.	Cálculo de la distribución longitudinal de temperatura.....	53
5.3.	Comparativa con la literatura.....	55
5.4.	Estudio de la influencia de otros parámetros.	56
5.4.1	Influencia de la temperatura exterior.....	56
5.4.2.	Influencia del gas utilizado en el interior de la cavidad.	59
5.4.3.	Influencia del espesor y la altura para el método de transferencia de calor en la cavidad.....	61
5.4.4.	Influencia de la calidad del vidrio.	66

5.5. Estudio de la condensación.....	66
6. Entorno socio económico.....	70
6.1. Presupuesto.....	70
6.2. Impacto socio económico	71
7. Conclusiones y trabajos futuros.....	73
8. Referencias	76
9. Anexos.....	79
A.1 Obtención de los coeficientes de convección y distribución de temperatura para Flujo de calor constante y Temperatura de la superficie uniforme.....	79
A.2 Obtención y estudio de las constantes c_0 , c_1 y m	87
A.3 Comparación entre gases en el interior de la cavidad.....	89

Índice de figuras

Figura 1. Cámara térmica sobre una vivienda [10]	9
Figura 2. Flujos de calor sobre una ventana en verano e invierno [18].....	11
Figura 3. Condensación en la zona interior de una ventana [20].	11
Figura 4. Convección natural en cavidad vertical [21].....	17
Figura 5. Transmitancia térmica de diferentes configuraciones de ventanas [13]	20
Figura 6. Representación de la viscosidad dinámica [22].	21
Figura 7. Representación de la capa límite térmica [23]	24
Figura 8. Valores de la velocidad del viento por zonas geográficas de España. [30]	26
Figura 9. Transmitancia térmica con diferentes espesores [13]	27
Figura 10. Ventana de doble acristalamiento con espaciador.	29
Figura 11. Medidas experimentales con kriptón en la cavidad [1].....	30
Figura 12. Representación de la temperatura y la altura adimensionales para 5 gases [1].	30
Figura 13. Convección natural en pared vertical.	31
Figura 14. Espesor de capa límite para superficies isotermas. [1]	35
Figura 15. Espesor de capa límite para flujo de calor uniforme [1]	35
Figura 16. Regresión lineal para obtener c y m [6].	37
Figura 17. Resultados de las constantes c y m [6].....	38
Figura 18. Temperatura frente altura con kriptón en la cavidad [6].....	39
Figura 19. Valores de Uref para diferentes gases en la cavidad [6].	39
Figura 20. Diseño de la ventana a estudiar.	40
Figura 21. Gráfica log (Na) frente a log (Ra*Pr)	47
Figura 22. Gráfica de la constante c frente a Uref.....	48
Figura 23. Gráfica de la temperatura 'Tgii' frente a la altura (Flujo de calor constante)49	
Figura 24. Gráfica de la temperatura 'Tgii' frente a altura (Temperatura de la superficie uniforme)	54
Figura 25. Gráfica de temperatura frente a altura (Resultado T. Munner con argón) [6]	55
Figura 26. Comparativa entre los modelos q" cte, Ts cte y las medidas experimentales de [6].....	56
Figura 27. Temperaturas medias máximas y mínimas de verano [12].....	58

Figura 28. Distribución de temperatura del cristal interior en la cavidad ‘Tgii’ comparando temperaturas exteriores	59
Figura 29. Distribución de temperatura del cristal interior en la cavidad ‘Tgii’ comparando gases.....	60
Figura 30. Gráfica de temperatura ‘Tgii’ frente a la altura (Altura de 0.8 m).....	62
Figura 31. Variación del flujo de calor en función del espesor de la cavidad.....	64
Figura 32. Mapa de zonificación de la temperatura exterior para cálculo de la condensación [29].....	67
Figura 33. Condiciones de temperaturas de diseño para interior [28].....	67
Figura 34. Diagrama psicrométrico [17]	69

Índice de tablas

Tabla 1. Propiedades del aire y argón en la cavidad con flujo de calor constante.	44
Tabla 2. Propiedades del aire y argón en la cavidad con la temperatura de la superficie uniforme	50
Tabla 3. Comparativa entre los resultados de utilizar diferentes temperaturas exteriores.	58
Tabla 4. Comparativa entre los resultados de diferentes gases.	60
Tabla 5. Comparativa entre los resultados para diferente altura de la ventana.	61
Tabla 6. Resultados para diferentes espesores de cavidad con $H=0.4$ m	63
Tabla 7. Resultados para diferentes espesores de cavidad con $H=0.8$ m	63
Tabla 8. Temperatura exterior para el cálculo de la condensación [29].	67
Tabla 9. Resultados para el cálculo de la condensación.	68
Tabla 10. Presupuesto de personal.	70
Tabla 11. Presupuesto de equipos y licencias informáticas.	71
Tabla 12. Resumen presupuestario	71

1. Introducción

1.1. Motivación

La eficiencia energética es, hoy en día, uno de los objetivos más perseguidos en el sector de la edificación, pues supone un significativo ahorro tanto económico como de gases contaminantes y de efecto invernadero, siendo la mitad del consumo energético de una vivienda el de la calefacción y el aire acondicionado. Ambos poseen como objetivo la búsqueda de una temperatura de confort deseada en el interior a partir del uso de energía o quema de combustibles.

Entonces, supone un gran inconveniente la pérdida innecesaria de calor en invierno o el excesivo calor que entre en verano, pues la diferencia de temperatura entre el interior y el ambiente exterior significa la transferencia de calor desde la zona de mayor temperatura a la de menor, pudiendo perder así las condiciones óptimas buscadas en la vivienda o incrementar el coste en mantenerlas. Las ventanas son el elemento del edificio por el que más energía se pierde en base al área ocupada, ya que son huecos necesarios en la vida cotidiana para el paso de luz, aire o calor. Por lo tanto, el aislamiento térmico en ellas es fundamental para poder minimizar dichas pérdidas conservando otras propiedades como la visibilidad. Como se puede observar en la Figura 1, la mayor parte de calor que se pierde en una vivienda es a través de las puertas y ventanas.



Figura 1. Cámara térmica sobre una vivienda [10]

Un buen aislamiento térmico en las ventanas de un edificio puede suponer grandes ahorros de energía, según un artículo del *Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía* (IDAE) [13], se puede llegar a valores del 30% de ahorro económico y de gases como el CO₂.

Como ya se ha comentado, las ventanas son uno de los puntos a tener más en cuenta para reforzar ante las pérdidas energéticas. Llegado el momento de instalar una nueva ventana, se puede elegir entre gran variedad de marcos y tipos de vidrio, siendo vital dicha decisión a la hora de aislar correctamente. Las diferentes configuraciones entre las que elegir aportan unas características u otras ante el paso del calor, como los materiales del marco, tipo de vidrio, espesores, gas en el interior de la cavidad, etc. Si la decisión final va en base a la búsqueda del confort térmico con la mínima pérdida energética, se deben elegir ventanas que ofrezcan altas resistencias térmicas o, utilizando el término equivalente a su inversa, con valores bajos de **transmitancia térmica**, concepto relacionado con la transferencia de calor explicado en los siguientes apartados.

Es por ese motivo, que en este trabajo se estudien los métodos de transferencia de calor que ocurren en una ventana de doble acristalamiento con un gas en la cavidad interior, tipo de ventana más utilizada por los consumidores y empresas del sector. Ya que una vez conocidos y estudiados estos métodos, se puede llegar a saber qué resistencia térmica es la que ofrece la ventana y con ello, el flujo de calor perdido a través de la misma.

Los espesores elegidos para vidrio y cavidad influyen en la resistencia que opone la ventana ante el paso de calor, por ello se hará comparaciones entre ventanas de distintos espesores para conocer su comportamiento e importancia frente al problema a estudiar. El cristal supone casi un 75% del hueco ocupado por la ventana, por lo tanto, el estudio se centrará en conocer las resistencias térmicas del doble acristalamiento sin tener en cuenta el marco.

Otro motivo importante del estudio térmico de una ventana es la posibilidad de que se produzca **condensación** en su interior, y con ello, todos los problemas que esto puede acompañar, desde estropear las paredes, formación de hongos, hasta problemas respiratorios debido a la humedad.

En las viviendas, actividades comunes y diarias como cocinar, ducharse, fregar, e incluso respirar, liberan vapor de agua al ambiente, lo que produce un aumento de la humedad relativa en el interior del hogar. Cuando la temperatura exterior es mucho más baja que la interior, el vapor de agua al contactar con la ventana, siendo éste, por lo general, el punto más frío de la vivienda hace bajar la temperatura del aire interior, y si es menor que la de saturación se produce el cambio de fase, formándose gotas en la superficie del cristal, es decir, se produce condensación.

En este trabajo se va a estudiar qué zona de la ventana es la que se encuentra a menor temperatura, es decir, donde es más probable que comiencen a formarse las gotas condensadas, ya que se va a demostrar como la temperatura no es constante a lo largo de todo el cristal.

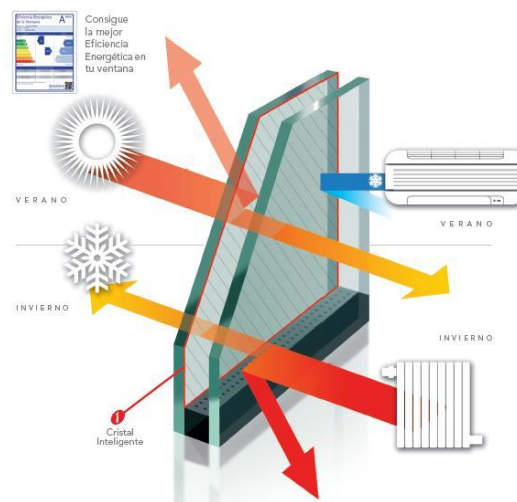


Figura 2. Flujos de calor sobre una ventana en verano e invierno [18]



Figura 3. Condensación en la zona interior de una ventana [20].

1.2. Objetivos.

El trabajo realizado sobre la transferencia de calor en ventanas con cavidad interior tiene varios objetivos analíticos y diferentes comprobaciones a llevar a cabo.

Como objeto principal del trabajo, se establece la demostración del crecimiento longitudinal de la temperatura de una ventana, mediante la formulación adecuada sobre la capa límite térmica en la convección interior del gas y los datos característicos del problema se calculan las temperaturas en cada punto vertical de la línea central de la ventana. Con ello, se realiza la comprobación numérica de cómo el cristal interior posee mayor temperatura en la zona alta de la ventana que en la más baja. Esto ayudará a conocer el punto donde se produzca antes la condensación y conocer la validez de ciertas teorías y estudios.

Para poder realizar dicha comprobación se necesita conocer los datos del problema. Se calculan las temperaturas en cada superficie de los cristales a ambos lados y la temperatura media a la que se encuentra el gas interno para conocer, de manera más precisa, sus propiedades. Y finalmente, con el cálculo de los coeficientes de convección se obtiene el valor de la transmitancia térmica, también será conocido el flujo de calor perdido y con ello se podrá mejorar energéticamente la eficiencia de la ventana. Previamente, se han buscado las correlaciones necesarias para el cálculo de cada resistencia térmica para poder completar así a los resultados pertinentes a cada modelo estudiado.

Otro de los objetivos del trabajo es conocer la influencia de parámetros como la altura, espesor del cristal o cavidad y condiciones externas e internas sobre el problema, o simplemente si en la resolución es más acertado considerar el flujo de calor constante o temperatura de la superficie uniforme. También se busca conocer el comportamiento de diferentes gases entre los cristales, como pueden ser el argón, xenón, nitrógeno o el aire, ya que cada uno aporta una resistencia térmica diferente y así se puede saber la importancia de utilizar uno u otro en conseguir aislar adecuadamente.

1.3. Fases de desarrollo.

Inicialmente, se ha requerido una búsqueda amplia de información respecto al tema dado en el trabajo mediante artículos científicos relacionados con la transferencia de calor en ventanas, o sobre gases utilizados en las cavidades de las mismas y sus propiedades a diferentes temperaturas para ser adaptadas correctamente a los datos del problema. Con el objetivo de conseguir la expresión de la temperatura respecto a la altura, se realizan cálculos analíticos en relación con la transferencia de calor por convección y la capa límite térmica para poder obtener una expresión final en función de las propiedades de los gases.

Posteriormente, era necesario mayor conocimiento sobre la convección natural, se han encontrado libros acerca de los posibles métodos de transferencia de calor, ya sea en el interior de la cavidad por convección natural o para el estudio del flujo de aire en el exterior. Esta información ha sido necesaria en diferentes etapas del trabajo, siendo de utilidad en el cálculo de coeficientes de convección mediante correlaciones o definiciones teóricas encontradas.

Para la obtención de los resultados numéricos buscados, como el flujo de calor, transmitancia térmica, temperatura de la ventana, etc. se realizan iteraciones con el software matemático Matlab, partiendo de resultados numéricos de otros estudios se calculan los valores propios del problema tratado en el trabajo.

Con dichos valores finales queda completa la expresión de la temperatura con todos sus parámetros conocidos. Se calcula en varios puntos de la línea longitudinal central de la ventana, ya que depende de la altura a la que se calcule se obtendrán valores diferentes.

Una vez conseguidos los resultados finales del problema, se obtienen los gráficos que muestran la tendencia ascendente de la temperatura en función de la altura en diferentes condiciones estudiadas, se comparan y se obtienen las conclusiones de cada uno de los parámetros influyentes.

1.4. Medios empleados

El trabajo se ha realizado mediante el software Matlab, programa de cálculo computacional idóneo para la resolución de problemas matemáticos y de ciencias e ingeniería.

Con el uso de dicho programa se reduce el tiempo en la resolución del trabajo, ya que simplifica los cálculos y facilita los cambios de valores a las variables. Gracias a su simplicidad en el uso de matrices y vectores, se han realizado varios análisis de sensibilidad para conocer errores y dependencias entre variables. También ha sido utilizado para la representación gráfica de datos, facilitando la obtención de resultados y conclusiones y las comparaciones entre las mismas.

Las iteraciones, necesarias en la resolución del trabajo, han sido programadas mediante bucles como *while* y *for*, utilizados para llegar a valores lógicos y precisos disminuyendo los errores en los datos utilizados y las soluciones.

Otra de las herramientas de Matlab usada en el trabajo es *CoolProp*, de gran utilidad para el cálculo de las propiedades de los gases, como densidad, viscosidad, difusividad térmica, etc. a la temperatura calculada en cada iteración, para conseguir así mayor precisión en los resultados.

1.5. Marco regulador.

En este apartado se trata la legislación aplicable en la realización del trabajo y estándares técnicos del campo de la transferencia de calor en ventanas con cavidad interior.

Se han utilizado documentos oficiales para determinar datos necesarios como temperatura interior o exterior y la velocidad del viento por zonas geográficas. Las normas seguidas son:

- Reglamento de Instalaciones Térmicas en Viviendas (RITE) [28]
- Código Técnico de Edificación (CTE) [30]
- Norma Básica de Edificación (NBE-CT-79) [29]

Para la elección de ventanas a estudiar se tienen en cuenta las configuraciones estandarizadas utilizadas en el comercio y los gases conocidos o que se encuentran en investigación o mejora.

2. Estado del arte

En este apartado se explican los conceptos teóricos necesarios para el entendimiento del trabajo. En él son definidas las propiedades térmicas utilizadas para la resolución del problema y los procesos de transferencia de calor que se encuentran generalmente en las proximidades e interior de ventanas, posteriormente se entra en detalle a la ventana estudiada y bajo condiciones dadas.

2.1. Transferencia de calor en ventanas

La transferencia de calor es el término con el que se define el estudio de los mecanismos y detalles de la transferencia de energía en forma de calor. Esta transferencia de energía ocurre cuando existe un gradiente de temperatura.

Una ventana está expuesta a diferentes mecanismos de transferencia de calor como consecuencia a la diferencia de temperatura existente entre el exterior y el interior de la sala. Debido a esa diferencia, el calor fluye desde el foco más caliente al de menor temperatura, es decir, en invierno se pierde calor desde el interior hasta el exterior y en verano el flujo se produce en sentido opuesto.

Los tres mecanismos característicos de la transferencia de calor son: la conducción, la convección y la radiación. Y serán explicados a continuación debido a su importancia en la ingeniería térmica y la elaboración de este trabajo, ya que en función del mecanismo existente puede variar considerablemente el valor del flujo de calor que se encuentra en transición.

2.1.1. Convección

El método de transferencia de calor por convección ocurre cuando hay una diferencia de temperaturas con un fluido en movimiento.

El fluido puede estar en movimiento debido a fuerzas externas, como la ejecutada por un ventilador, viento o una bomba; en este caso la convección es denominada forzada. En la convección natural o libre existe un movimiento de fluido debido a un gradiente de densidad ocasionado por la diferencia de temperatura. Un fluido a mayor temperatura

tiene menor densidad y tiende a subir en contra de la gravedad provocando que parte del mismo fluido a menor temperatura quede por debajo del anterior. Por lo tanto, la velocidad del fluido en este segundo caso es menor que si actúa un agente externo y, en consecuencia, el coeficiente de transferencia de calor por convección es de menor magnitud.

En el interior de una cavidad, el gas se encuentra entre dos paredes verticales a diferentes temperaturas, la parte del gas cercana a la superficie más caliente subirá. Y posteriormente, su temperatura baja debido a la cercanía con la otra superficie haciendo descender el gas, provocando un continuo movimiento debido a las variaciones de densidad, a su vez provocadas por las diferentes temperaturas como se aprecia en la figura 4.

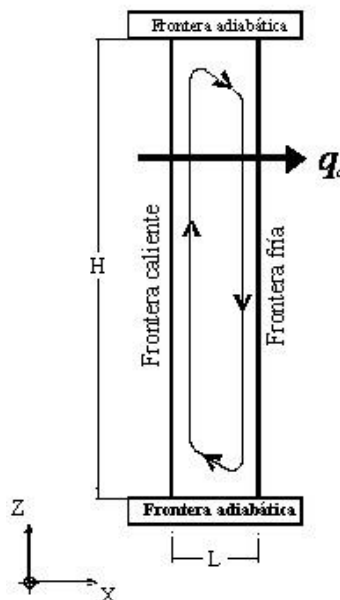


Figura 4. Convección natural en cavidad vertical [21]

En el problema estudiado de una ventana, se pueden encontrar varios casos de transferencia de calor por convección, pues a ambos lados de los cristales se encuentra aire en movimiento, aunque el viento determinará si el flujo es forzado o natural.

2.1.4. Conducción

La conducción es el método de transferencia de calor a través de cuerpos sin movimiento, ya pueden ser gases, líquidos o sólidos.

En el caso de líquidos y gases, se producen movimientos aleatorios de las partículas más energéticas hacia las de menor energía, a consecuencia de una diferencia de temperatura, produciendo colisiones e intercambiando energía. En un sólido, la transferencia energética se debe a ondas reticulares por el movimiento atómico a causa del gradiente de temperatura y es el único método por el que se puede transferir calor a través de un sólido opaco [9].

En el caso a estudiar de una ventana, uno de los medios a transferir calor por conducción es el marco, pero como ya se ha comentado, el trabajo se centra en conocer el comportamiento de los vidrios, en los cuales también se transfiere calor por conducción. Otro de los medios posible a transferir calor por conducción es el gas encerrado en la cavidad interior, más adelante se estudia esta posibilidad ya que el espesor es de reducido tamaño y el gas puede considerarse parado.

2.1.5. Radiación

Es la transferencia de energía mediante ondas electromagnéticas con una longitud de onda definida, es decir, no necesita un medio natural como la convección o la conducción. Se produce por la emisión de energía de un a cuerpo especial, como el sol, a temperatura finita [8].

En ventanas, la radiación se produce por los rayos de sol incidentes sobre el cristal exterior, aumentando la temperatura y el flujo de calor hacia el interior.

Como esta forma de transferencia de calor es independiente de la ventana que se utilice no se incluirá en los cálculos del trabajo, podría tenerse en consideración en el flujo de calor, pero su valor es menor al de los demás métodos comentados. El flujo de calor es calculado a partir de la resistencia que supone la propia ventana sin considerar la radiación.

2.2. Tipos de cerramientos

Las ventanas son cerramientos que permiten al interior de una vivienda conseguir luz y ventilación, pero también suponen pérdidas de calor considerables. Por este motivo, se ha avanzado en gran medida en la tecnología que rodea a las ventanas para conseguir el mayor aislamiento térmico con las mejores propiedades térmicas, económicas y de visibilidad.

Se estudia únicamente el cristal del cerramiento, pues corresponde a la mayor parte de la superficie y es la parte sobre la que se va a realizar el estudio de la temperatura.

Los tres tipos principales de acristalamiento son los siguientes [13]:

- **Monolítico o vidrio sencillo:** compuesto únicamente por una superficie de cristal formada por una o más hojas de vidrio. Este tipo posee características estándar y cuanto mayor sea el espesor o el número de hojas, menor es la transmitancia térmica, siendo un valor medio aproximado de esta $5.7 \text{ W/m}^2\text{K}$. Esta configuración supone una baja resistencia al calor transferido y mayor pérdida energética.
- **Doble acristalamiento o unidad de vidrio aislante (UVA):** esta tipología consta de dos superficies de vidrio separadas de una o varias pequeñas cavidades. Cuenta con mejores cualidades térmicas que la de vidrio sencillo. La cavidad permite aprovechar la alta resistencia térmica del aire u otro gas en reposo, disminuyendo fuertemente la transmitancia térmica de la ventana. La nomenclatura seguida es mediante la utilización de los espesores de los vidrios y el de la cavidad, por ejemplo 4-12-4 muestra una ventana con dos vidrios de 4 mm de espesor y una cavidad de 12 mm de espesor.
- **Vidrio de baja emisividad:** con la configuración anterior (UVA) se mejoran las propiedades térmicas mediante una fina capa de óxidos metálicos a los vidrios, proporcionando mayor aislamiento térmico.

En la figura 5 se realiza una comparación entre las tipologías comentadas en este apartado, mostrando la transmitancia térmica de cada vidrio y cómo mejora el aislamiento térmico en cada caso.

Transmitancia térmica del hueco (W/m²K)

Vidrio (70%)		Marco (30%)			
		Metálico U=5,7	Metálico RPT ⁵ U=4	Madera ⁶ U=2,5	PVC ⁷ U=1,8
Monolítico 4mm	U=5,7	5,7	5,2	4,7	4,5
4-6-4	U=3,3	4	3,5	3,0	2,8
4-12-4	U=2,9	3,7	3,2	2,7	2,5
4-6-4 bajo emisivo ⁸	U=2,5	3,5	3,0	2,5	2,3
4-12-4 bajo emisivo ⁸	U=1,7	2,9	2,4	1,9	1,7

Figura 5. Transmitancia térmica de diferentes configuraciones de ventanas [13]

Se puede observar en la figura 5 como el vidrio monolítico presenta menor resistencia térmica que los demás, siendo de mayor efectividad el vidrio de baja emisividad con la utilización de doble acristalamiento, con el que se reduce considerablemente la transmitancia térmica del hueco.

Los diferentes espesores que pueden ser utilizados para la cavidad son desde 4 mm hasta 12 mm aproximadamente, se explica en el próximo apartado cuál es la importancia de los diferentes tamaños y cómo transfiere calor el gas en función del espesor utilizado.

La utilización de un vidrio con menor transmitancia térmica y cavidad de 12 mm de espesor puede reducir las pérdidas energéticas más de un 50% respecto a uno monolítico y de marco similar, suponiendo un ahorro significativo tanto económico como energético.

2.3. Propiedades de los gases.

Uno de los elementos principales de las ventanas a estudiar es el gas que se encuentra en el interior de la cavidad, ya que aumenta las propiedades aislantes de la ventana.

En este apartado se explican algunas de las propiedades de los gases que serán útiles a lo largo del trabajo, para facilitar el entendimiento de las expresiones finales del trabajo.

2.3.1. Viscosidad dinámica (μ)

Los fluidos, ya sean líquidos o gases, se deforman constantemente bajo la acción de una fuerza externa. La relación entre los esfuerzos sufridos bajo la deformación y la tensión aplicada viene dada por la **viscosidad dinámica**, ya que su característica es la oposición al movimiento por la tensión ejercida [4].

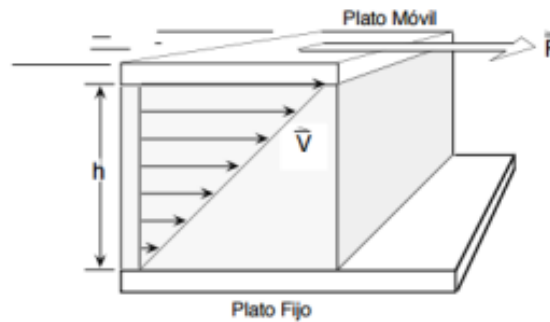


Figura 6. Representación de la viscosidad dinámica [22].

En la figura 6 se muestra la distribución de velocidad del fluido en función de la altura, siendo nula en el contacto con la placa inferior, esto se debe al efecto de la viscosidad del fluido oponiéndose al movimiento.

Sus unidades son $[Kg \times m^{-1} \times s^{-1}]$

2.3.2. Viscosidad cinemática (ν)

En otras ocasiones, la viscosidad dinámica se presenta sin atender a las fuerzas que producen el movimiento, se divide entre la propia densidad del fluido y se obtiene a **viscosidad cinemática** con unidades de velocidad, como las siguientes $[m^2 \times s^{-1}]$ [4].

2.3.3. Densidad (ρ)

Es la magnitud que relaciona la cantidad de masa del fluido por unidad de volumen. Sus unidades son sencillamente intuitivas, $[Kg \times m^{-3}]$.

Un fluido de mayor densidad presenta más resistencia al paso del calor, por lo tanto, para un aislamiento térmico correcto será más beneficioso un gas de mayor densidad, aunque se deben cumplir muchas otras propiedades.

2.3.4. Coeficiente de expansión volumétrica (β)

Es el fenómeno que describe el factor de compresibilidad debido al aumento de temperatura, que implica la variación de densidad y volumen en el gas [4].

La dimensión que define el valor de β es la inversa de la temperatura [K^{-1}].

2.3.5. Difusividad térmica (α)

Esta propiedad muestra cómo de rápido se transfiere el calor a través de un material a razón de su capacidad de acumularlo y queda definida como:

$$\alpha = \frac{\text{calor conducido}}{\text{calor almacenado}} = \frac{k}{\rho c_p} [m^2/s]$$

Al producto de la densidad por el calor específico se le denomina capacidad calorífica, la cual representa la capacidad de un material para almacenar calor por unidad de volumen. Y la conductividad térmica del material muestra la capacidad de transferir calor por un material. Fácilmente se deduce que, si se posee una alta difusividad térmica, más rápida será la transferencia de calor, siendo transferida más cantidad de calor que la que es absorbida [5].

2.3.6. Conductividad térmica (k)

Esta propiedad de los materiales indica la velocidad con la que es transmitido el calor a través de un material y la representación macroscópica del efecto de las moléculas que efectúa el calor sobre el gas.

Propiedad característica de la transferencia de calor por conducción, con unidades [$W \times m^{-1} \times K^{-1}$].

2.3.7. Transmitancia térmica (U_{ref})

Este coeficiente muestra la transmisión de calor a través de uno o varios fluidos o cuerpos, ya que indica la facilidad con la que fluye el calor.

También llamado, coeficiente de transmisión de calor, en cerramientos mide la transferencia de calor teniendo en cuenta los ambientes exteriores, es decir, representa la inversa de las resistencias por conducción, pero también las de convección del exterior.

Es calculado mediante la inversa de la **resistencia térmica**, es decir, influye de manera contraria en el flujo de calor o variación de temperatura. A valores bajos de transmitancia térmica, la resistencia que se opone al paso de calor es mayor y las temperaturas son más próximas. Este factor es de gran importancia a la hora de calcular las resistencias que suponen las diferentes ventanas y por ello es la característica con la que identifican.

$$U_{ref} = R_t^{-1} \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

2.3.8. Número de Prandtl (Pr)

Esta característica adimensional de los fluidos relaciona el calor transferido por un medio con la cantidad de movimiento del mismo, es decir, se expresa como el cociente entre la viscosidad y la difusividad térmica:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

En los gases o metales líquidos ($Pr < 1$) el calor se transfiere fácilmente en relación con su capacidad de movimiento, al contrario que en los aceites ($Pr > 1$).

2.3.9. Capa límite térmica

Cuando un fluido fluye por la superficie de otro cuerpo a diferente temperatura, se forma una capa límite térmica. La parte del fluido en contacto con la superficie llega al equilibrio térmico hasta igualar su temperatura con la de la placa. Estas partículas que han cambiado su temperatura intercambian energía con las más próximas y así sucesivamente hasta llegar al límite del espesor de la capa límite térmica, en el cual la diferencia de temperaturas entre las partículas del fluido en dicho punto y la superficie se aproxima al valor $|T - T_s| = 0.99 \times |T_\infty - T_s|$ [5] como muestra la figura 7:

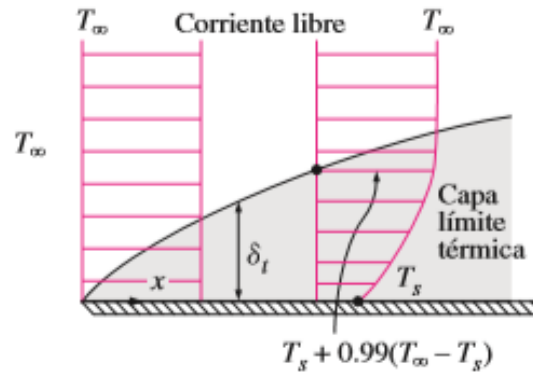


Figura 7. Representación de la capa límite térmica [23]

2.4. Física del problema

En este apartado se muestra la relación entre los métodos de transferencia de calor explicados en el punto anterior y su relación con una ventana de doble acristalamiento, se explica qué métodos se pueden encontrar y cuál es el utilizado en la resolución del problema.

Se supone una ventana de una vivienda en la que la temperatura interior de la sala es mayor que la del exterior, es decir, existe un gradiente de temperatura que supone el paso de calor a través de las superficies desde el interior hacia el exterior de la vivienda.

La convección es la transferencia de calor más importante en una ventana, ya que se encuentra rodeada de aire a ambos lados. Este aire puede darse a diferentes condiciones si se trata del interior o exterior.

La radiación no ha sido considerada a la hora de plantear el trabajo, se ha querido centrar el estudio en la convección y conducción, métodos principales de transferencia de calor en una ventana y, en especial, para el gas de la cavidad interior. La convección influye, como así se verá más adelante, en el aumento de temperatura a lo largo de la ventana y la conducción se da en los vidrios y puede ser de gran importancia en el aislamiento térmico de la cavidad interior.

2.4.1. Transferencia de calor en el interior de la vivienda.

En el interior, el aire se encuentra en movimiento a bajas velocidades y la convección es natural, existe un gradiente de temperatura entre la superficie de vidrio de la ventana y el aire próximo a ella. Por lo tanto, se produce transferencia de calor cuando el aire varía su densidad con el cambio temperatura, produciéndose un movimiento del fluido y modificando así las condiciones térmicas de la sala. Se transfiere calor desde el aire interior de la vivienda hacia el acristalamiento, aumentando la temperatura de este último.

2.4.2. Transferencia de calor en el ambiente exterior.

En el exterior, las condiciones pueden variar en gran medida en función del clima, estación del año o incluso en función de la hora en la que se estudie dentro de un mismo día.

En este caso, debido a las acciones del viento, se debe realizar la comprobación de si la convección más influyente en el proceso es forzada o natural. En este caso, se ha considerado una velocidad del viento dada por el Código Técnico de Edificación (CTE) de 26 km/h en zona A [30], esto significa que la convección existente es forzada, aumentando así el coeficiente de convección en la parte exterior de la ventana, lo que significa mayor pérdida de calor hacia el ambiente exterior.

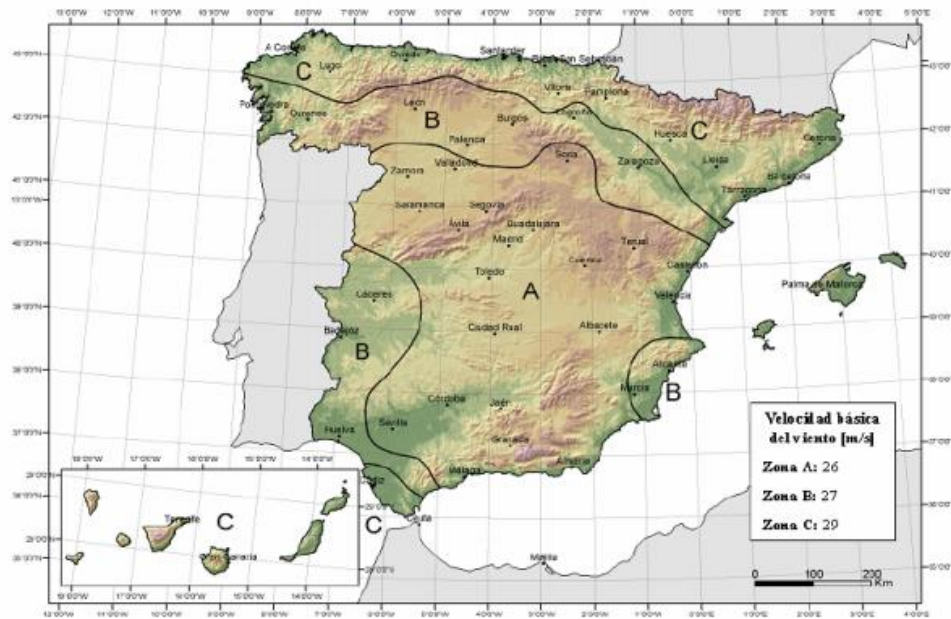


Figura 8. Valores de la velocidad del viento por zonas geográficas de España. [30]

2.4.3. Transferencia de calor en la cavidad interior.

Como ya se ha explicado anteriormente, un gas encerrado entre dos superficies a diferente temperatura puede transferir calor mediante convección natural, en este caso desde el cristal del interior de la vivienda al del exterior.

Cuando se trata de una ventana, la cavidad es de reducido tamaño (4, 6, 12 mm...) y puede que no dé lugar al movimiento del gas, ni si quiera por cambios de densidad, y este se encuentre en reposo, de esta manera se transfiere calor por conducción. La conducción, intencionadamente buscada, implica que se reduzca el calor que pasa a través del gas, suponiendo mayor resistencia térmica y consiguiendo más aislamiento debido a la baja conductividad de algunos gases.

Se pueden utilizar diferentes tamaños de espesor para la cavidad, cuanto mayor sea su tamaño más resistencia térmica opone, disminuyendo la transmitancia térmica. En cambio, hay valores de espesor que suponen la pérdida de la conducción y comienza a transferirse calor por convección y esto significa el aumento de la transmitancia térmica y con ello, la pérdida de las características buscadas. El valor teórico de dicho espesor está alrededor de los 16 mm aproximadamente, este valor es calculado con las condiciones dadas y se muestra en el apartado de resultados.

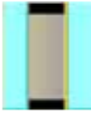
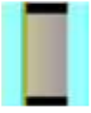
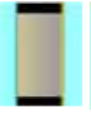

Composición ⁴ con un vidrio normal y un vidrio de baja emisividad ($\epsilon \leq 0,03$)	4-6-4	4-8-4	4-10-4	4-12-6
				
U (W/m²K)	2,5	2,1	1,8	1,7

Figura 9. Transmitancia térmica con diferentes espesores [13]

En cuanto al gas interior de la cavidad, se debe saber que el aire no es el único gas que se puede utilizar en el interior de las ventanas. En este caso, el gas utilizado es el argón, el cual presenta una conductividad térmica menor y ofrece mayor resistencia al paso del calor, por lo tanto, ofrece mejores propiedades aislantes que el aire como se demuestra en este trabajo.

3. Planteamiento del problema.

La realización de este trabajo está basada en el estudio previo realizado por N. Abodahab y T. Munner [6]. Su trabajo llamado “Free convection analysis of a window cavity and its longitudinal temperature profile” está motivado por los problemas cotidianos que suponen las ventanas dentro de una vivienda. Por un lado, la pérdida energética y aumento de dióxido de carbono debido a la poca resistencia térmica que ofrecen en comparación con otros cerramientos como las paredes, y, por otro lado, la condensación que se produce en ellas a consecuencia de las bajas temperaturas del exterior.

Se pretende demostrar como aumenta longitudinalmente el perfil de temperatura en el centro de la ventana interior, para desmentir así la teoría de Pilkington, la cual decía que la temperatura es constante a lo largo de la misma. Para ello, primero se debe llegar a una expresión que permita calcular la temperatura en los distintos puntos longitudinales en una cavidad vertical en la que se transmite el calor por convección natural. A partir de expresiones de ingeniería térmica sobre la transferencia de calor, se comprueba que es necesario conocer las condiciones de la capa límite térmica en convección natural. Gracias al estudio realizado por A. Bejan [1] se consigue una definición matemática de la capa límite que permite llegar a la expresión buscada de la temperatura, como se verá en este apartado del trabajo.

Una vez conocidas las temperaturas de los puntos necesarios se realizan comparaciones con estudios previos gracias a gráficas aportadas por los autores, las cuales servirán para la validación del modelo utilizado y los resultados de este trabajo.

3.1. Medidas experimentales de temperatura.

En primer lugar, se muestran las medidas experimentales de temperatura utilizadas en [6] y las conclusiones a las que llegaron a partir de dichas medidas.

Se tomaron experimentalmente las temperaturas de 12 puntos distintos longitudinalmente, cogiendo medidas en cada punto en rangos de 10 minutos. Variando el tipo de cubierta, gas o perfil del acristalamiento, todas ellas en invierno, ya que encontrando temperaturas más bajas hay mayor probabilidad de que se produzca

condensación. Conseguidas finalmente 600 medidas de temperatura diferentes, se llega a la conclusión de que la temperatura aumenta longitudinalmente en el cristal de la ventana debido a dos factores:

- La **convección natural** del gas interior, debido a la circulación continua del gas desde el lado caliente al frío, realizando movimientos ascendentes y descendientes, aumentando la temperatura debido a la ascensión del gas en su estado de mayor energía. Este se considera el factor principal del aumento de temperatura.
- Los efectos de conducción del aislante térmico actuando de separador entre ambos cristales (**espaciador**). Con este elemento se intenta eliminar la condensación aumentando la resistencia térmica en los bordes del cristal, zonas más sensibles ante el paso del calor.



Figura 10. Ventana de doble acristalamiento con espaciador.

Primeramente, se comprueban las temperaturas de una ventana de doble acristalamiento de baja emisividad con Kriptón en la cavidad, su valor de transmitancia térmica característico es de $1.14 \text{ W/m}^2\text{K}$ y el resultado de la medición es el siguiente:

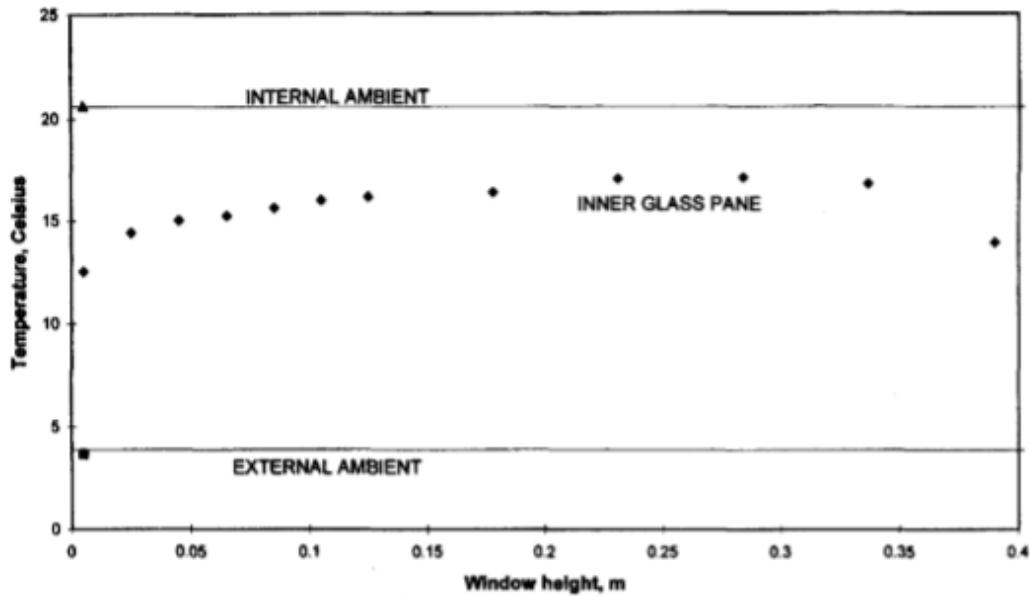


Figura 11. Medidas experimentales con kriptón en la cavidad [1].

Finalmente, con todas las configuraciones medidas en las diferentes ventanas, se realiza un gráfico comparativo entre ellas con parámetros adimensionales, para poder realizar una correcta comparación entre las configuraciones con distintos gases utilizados.

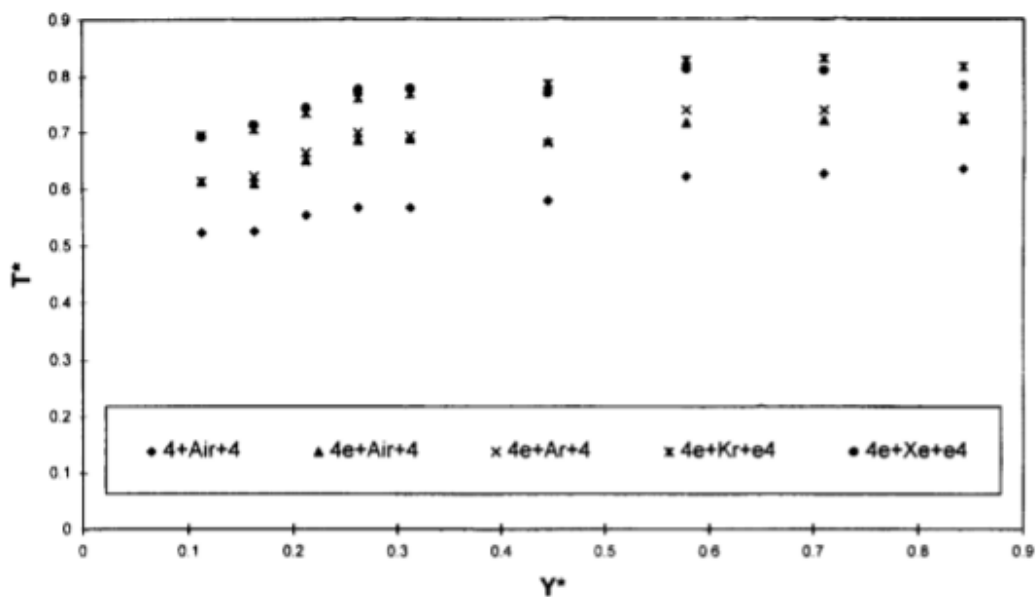


Figura 12. Representación de la temperatura y la altura adimensionales para 5 gases [1].

Como se ha comentado anteriormente y se ha mostrado en la Figura 12, las ventanas que cuentan con xenón en su interior son más aislantes térmicamente que las comúnmente conocidas de aire, como poseen menor transmitancia térmica, la temperatura del cristal interior es mayor, pues se opone más al paso del calor. También se debe comentar la variación térmica de cada punto representado, ya que cuanto más

alto se encuentre, mayor es la temperatura, como así comentaban en su estudio los autores.

3.2. Modelo físico para la obtención de la expresión final de la temperatura.

Una vez conocido el incremento de temperatura experimentalmente, se procede a deducir la expresión de la temperatura en función de la altura y otros parámetros característicos de los gases del interior, como son los números de Rayleigh y Prandtl, con los que se demostrará teóricamente dicho aumento en las ventanas a estudiar.

Primero, en la convección natural se estudian las fuerzas y la transferencia de calor para conocer la expresión del espesor de la capa límite térmica, como se verá posteriormente, la temperatura depende de dicho parámetro y se necesita conocer su expresión para poder relacionar la temperatura con las diferentes propiedades de los gases que intervengan. Basando el análisis y obtención de las expresiones en [1].

3.2.1. Expresión del espesor de la capa límite térmica.

Dentro de la capa límite, el fluido se encuentra en condiciones diferentes al exterior de la misma, y es por ello por lo que se realiza este estudio de las diferentes fuerzas ejercidas en el interior y la relación existente entre ellas.

En estado estacionario, el calor conducido desde la pared horizontalmente hacia el fluido es barrido hacia arriba mediante una transmisión de entalpía como se esquematiza en la figura 13.

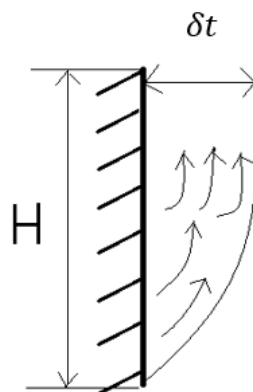


Figura 13. Convección natural en pared vertical.

Las ecuaciones del momento y energía de Navier-Stokes para un flujo dimensional en estado estacionario muestran las fuerzas en función de las velocidades, temperatura o las dimensiones de la capa límite térmica, que son las incógnitas que se presentan:

- Ecuación del momento:

$$u \times \frac{\partial v}{\partial x} + v \times \frac{\partial v}{\partial y} = \nu \times \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + g \times \beta \times (T - T_{\infty})$$

- Ecuación de la energía:

$$u \times \frac{\partial T}{\partial x} + v \times \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \times \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

De la ecuación del momento surgen 3 fuerzas (inercia, fricción y flotabilidad) que será clave conocer para llegar hasta la expresión buscada. Sabiendo que $x \sim \delta_t$ e $y \sim H$:

$$\text{Inercia} = \left(u \times \frac{v}{\delta_t}, v \times \frac{v}{H} \right)$$

$$\text{Fricción} = \nu \times \frac{v}{\delta_t^2}$$

$$\text{Flotabilidad} = g \times \beta \times \Delta T$$

Mediante las ecuaciones de la conservación de la masa y de la energía en la capa límite térmica se puede obtener la primera incógnita, la componente vertical de la velocidad (v), mientras que δ_t es desconocido hasta el momento.

Conservación de la masa:

$$\frac{u}{\delta_t} \sim \frac{v}{H}$$

Conservación de energía:

$$v \times \frac{\Delta T}{H} \sim \alpha \times \frac{\Delta T}{\delta_t^2}$$

Despejando la velocidad de la conservación de la energía se llega a:

$$v = \frac{\alpha \times H}{\delta_t^2}$$

Junto a las expresiones de conservación de la masa y el valor de v , se puede obtener el valor del espesor de la capa límite térmica (δ_t) igualando las expresiones de las fuerzas según corresponda, que será explicado posteriormente. Para facilitar los cálculos, se dividen todas ellas entre el término de la flotabilidad y se sustituye el valor de v que ha sido obtenido anteriormente.

$$\text{Inercia} = \left(\frac{H}{\delta_t} \right)^4 \times Ra_H^{-1} \times Pr^{-1}$$

$$\text{Fricción} = \left(\frac{H}{\delta_t} \right)^4 \times Ra_H^{-1}$$

$$\text{Flotabilidad} = 1$$

Siendo el número de Rayleigh:

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TH^3}{\alpha\nu}$$

Se observa que la única diferencia entre las expresiones de inercia y fricción es el número de Prandtl, es decir, una propiedad característica del fluido. Por lo tanto, los gases de números de Prandtl altos formarán una capa límite con un balance entre las fuerzas de fricción y las de flotabilidad debido al bajo valor de la fuerza de inercia. En cambio, con valores bajos de Pr , en la capa límite existirá un balance entre las fuerzas de inercia y las de flotabilidad, siendo la restante muy inferior a las demás.

A. Fluidos con valores altos de Pr .

Como ya se ha comentado, cuando $Pr \gg 1$, se igualan las fuerzas de fricción y de flotabilidad, pues la inercia sería de valor muy reducido en comparación con las otras fuerzas y se obtiene la expresión del espesor de la capa límite siguiente:

$$\left(\frac{H}{\delta_t} \right)^4 \times Ra_H^{-1} = 1$$

$$\delta_t \sim H(Ra_H)^{-1/4}$$

Se sustituye el valor del espesor en la expresión de la velocidad despejada desde la conservación de energía para obtener la velocidad y así tener despejadas las dos incógnitas principales:

$$v \sim \frac{\alpha}{H} \times (Ra_H)^{1/2}$$

El número de Nusselt, sustituyendo el valor de h como k/δ_t , queda de la siguiente forma:

$$Nu = \frac{hH}{k} \sim (Ra_H)^{1/4}$$

B. Fluidos con valores bajos de Pr.

En este caso, siendo $Pr \ll 1$ existe un balance entre las fuerzas de inercia y flotabilidad, para poder conseguir las expresiones del espesor de capa límite, la velocidad y el número de Nusselt se igualan ambas fuerzas y se realizan las mismas operaciones anteriores:

$$\left(\frac{H}{\delta_t}\right)^4 \times Ra_H^{-1} \times Pr^{-1} = 1$$

$$\delta_t \sim H(Ra_H \times Pr)^{-1/4}$$

$$v \sim \frac{\alpha}{H}$$

$$Nu = \frac{hH}{k} \sim (Ra_H \times Pr)^{1/4}$$

3.2.2. Expresión de la temperatura.

Se puede considerar la suposición de que las paredes verticales, en este caso los cristales, son isotermos y su temperatura es constante en toda la altura, esta aproximación será válida en el caso de cristales de gran altura y con alta conducción de calor en dirección vertical.

Sin embargo, como punto de partida, se tomará la suposición de que el flujo de calor es uniforme, ya que, en muchos casos, como es el de este estudio, el calor surge desde uno de los lados hacia el otro. A continuación, se muestran las diferencias esquemáticas entre ambos casos en las figuras 14 y 15.

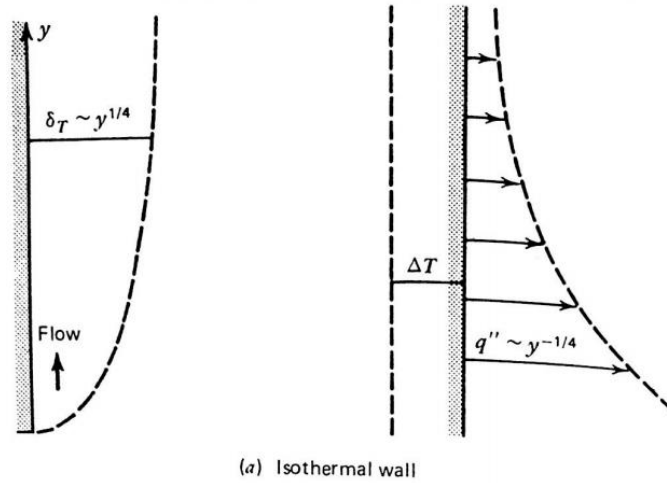


Figura 14. Espesor de capa límite para superficies isotermas. [1]

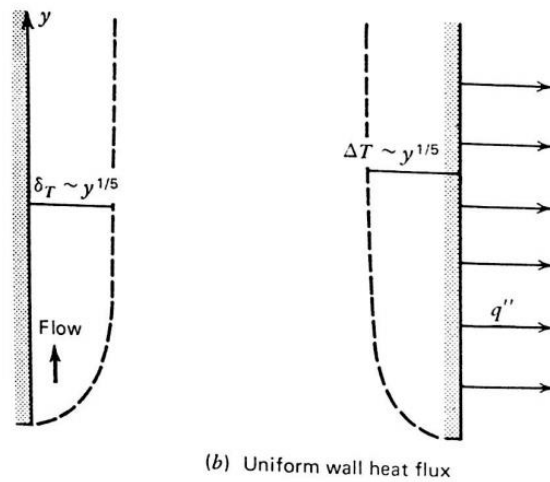


Figura 15. Espesor de capa límite para flujo de calor uniforme [1]

Para conocer cómo varían el flujo de calor, la temperatura y el espesor de capa límite con la altura, se utilizan la siguiente definición básica de la transferencia de calor y se sustituyen las incógnitas para cada caso según sea el valor del número de Prandtl:

$$q'' \sim k \times \frac{\Delta T}{\delta_t}$$

A. Fluidos con valores altos de Pr.

Se usan las expresiones conocidas para este caso en el que $Pr \gg 1$:

$$\delta_t \sim H(Ra_H)^{-1/4}$$

O lo que es lo mismo, sustituyendo el valor de Rayleigh:

$$\delta_t \sim H\left(\frac{g\beta\Delta TH^3}{\alpha\nu}\right)^{-1/4}$$

Como el valor de ΔT es desconocido para el caso de flujo de calor uniforme, el número de Rayleigh se escribe en función del flujo de calor. Sustituyendo la siguiente expresión en la de espesor de capa límite anterior:

$$\delta_t \sim H(Ra_H^*)^{-1/5}$$

$$\Delta T \sim \frac{q''}{k} H(Ra_H)^{-1/5}$$

B. Fluidos con valores bajos de Pr.

Al igual que en caso anterior, se utiliza el número de Rayleigh con el flujo de calor y no las temperaturas, las cuales son desconocidas, y se consigue la expresión de la temperatura que se buscaba al inicio de este apartado.

$$\delta_t \sim H(Ra_H^* \times Pr)^{-1/5}$$

Por lo tanto, como la ecuación buscada en para gases, el trabajo se centra en los fluidos con bajo número de Pr y, en consecuencia, la ecuación buscada para la temperatura en función de la altura de la ventana es la siguiente:

$$\Delta T \sim \frac{q''}{k} H(Ra_H \times Pr)^{-1/5}$$

A continuación, se sustituye el valor de Ra para obtener la expresión en función de propiedades del gas interior:

$$\Delta T \sim \frac{q''}{k} H \left[\frac{g\beta H^4 q''}{\alpha \nu k} \times \text{Pr} \right]^{-1/5}$$

Finalmente, se redefine la ecuación generalizándola para hacerla más precisa en cada uno de los casos estudiados:

$$\Delta T \sim c \times \frac{q''}{k} H (Ra_H \times \text{Pr})^m$$

A continuación, se obtienen las constantes c y m , las cuales serán de valores diferentes para cada alternativa utilizada.

Se hace uso del número adimensional de Napier y se sustituye la expresión de la variación de temperatura para simplificar factores:

$$Na = \frac{\Delta T \times k}{q'' \times H}$$

$$Na = c \times [Ra_H \times \text{Pr}]^m$$

Con la ecuación escrita de esta forma se pueden obtener las constantes usando logaritmos mediante la regresión lineal de la misma, obteniendo los valores de la pendiente y la ordenada en el origen para diferentes gases.

$$\log(Na) = \log(c) + m \times [Ra_H \times \text{Pr}]$$

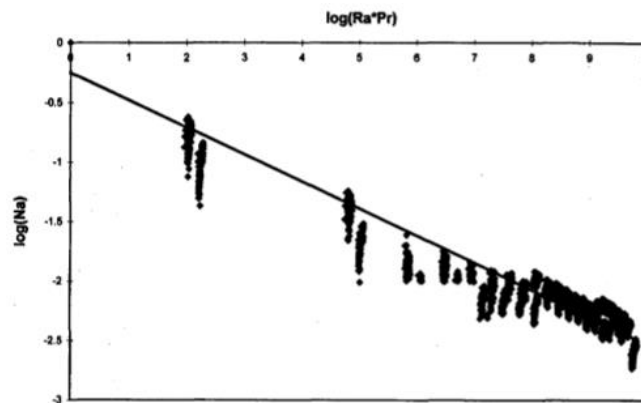


Figura 16. Regresión lineal para obtener c y m [6].

Window classification	c	m
4-Air12-4	0.3	-0.19
4-Ar12-4	0.43	-0.24
4-Air12-E4	1.06	-0.22
4-Ar12-E4	0.91	-0.22
4E-Kr12-E4	0.57	-0.18
4E-Xe10-E4	0.61	-0.19

Figura 17. Resultados de las constantes c y m [6]

En el artículo se grafican los grupos adimensionales $\log (Na)$ y $\log (Ra \cdot Pr)$ de los diferentes gases que puedes encontrarse en la cavidad interior de ventanas, con este método se obtienen expresiones que se ajustan más fielmente a la expresión de la temperatura en cada caso.

Los valores conseguidos para la constante m son muy próximos en todos los gases, en cambio la ordenada en el origen varía considerablemente, por esta razón se entiende que sobre c actúa la única característica diferente a cada ventana, la transmitancia térmica (U_{ref}). Se supone que el valor de la ordenada en el origen depende de dos constantes y del valor de U_{ref} para ser más precisos y conocer la variación en cada una de las ventanas:

$$c = c_0 + c_1 \times U_{ref}$$

Para conocer estas constantes, el autor del artículo científico realizó medidas experimentales de la temperatura para cada uno de los gases, obteniendo los siguientes valores medios:

$$c_0 = 1.1563$$

$$c_1 = -0.31$$

$$m = -0.2$$

Finalmente, se llega a una expresión de la temperatura mediante un modelo físico, que posteriormente se grafica para conocer las diferencias entre las teorías. Esta temperatura corresponde a la superficie en contacto con el gas de la ventana interior.

$$T = T_f + \frac{q'' \times H \times c}{k} \times \left[\frac{g \times \beta \times H^4 \times q'' \times Pr}{\alpha \times k \times \nu} \right]^m$$

Esta expresión facilita el cálculo de la variación longitudinal de temperatura de un cristal en una ventana de doble acristalamiento con cavidad interior.

En la figura 18 tomada de [6], se muestra como la temperatura de la parte más baja de la ventana es menor que en la parte superior, como así se quería demostrar.

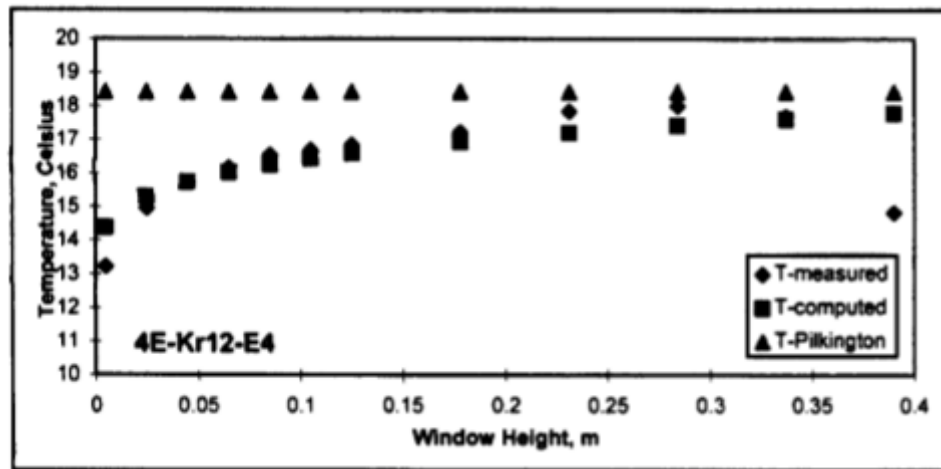


Figura 18. Temperatura frente altura con kriptón en la cavidad [6].

En la Figura 18 se muestran tres temperaturas diferentes en cada punto, las medidas experimentalmente, las que mostraba la teoría de Pilkington y las calculadas mediante la expresión dada por la convección natural. Se observa claramente cómo se ajusta el modelo físico calculado y las medidas realizadas experimentalmente, pudiendo afirmar el error cometido por la teoría anterior. También se puede conocer gracias a las temperaturas medidas, que la temperatura en el punto más bajo y en el más alto de la ventana es menor en comparación a la que se calcula matemáticamente, esto se debe al efecto de borde de la ventana.

Con todos los resultados ya conocidos, se aporta un cuadro con las transmitancias térmicas de las distintas ventanas calculadas.

Table 1. Window configurations used in the present work

Trade name	Design details	Classification	Uref
4-Air12-4	4-mm float glass + 12-mm air gap + 4-mm float glass	Low-tech ¹	2.86
4-Ar12-4	4-mm float glass + 12-mm argon gap + 4-mm float glass	Low-tech	2.72
4-Air12-E4	4-mm float glass + 12-mm air gap + 4-mm low emissivity coated glass	High-tech ¹	1.83
4-Ar12-E4	4-mm flat glass + 12-mm argon gap + 4-mm low emissivity coated glass	High-tech	1.53
4E-Kr12-E4	4-mm low emissivity coated glass + 12-mm krypton gap + 4-mm low emissivity coated glass	High-tech	1.14
4E-Xe10-E4	4-mm low emissivity coated glass + 10-mm xenon gap + 4-mm low emissivity coated glass	High-tech	0.91

1. Low-tech window: arbitrarily defined as a window with U -value $> 2.0 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

2. High-tech window: arbitrarily defined as a window with U -value $< 2.0 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

Figura 19. Valores de Uref para diferentes gases en la cavidad [6].

4. Modelo numérico

Dada una ventana de doble acristalamiento con gas en el interior de la cavidad, se exponen los datos de partida y las consideraciones tomadas en este apartado del trabajo.

El esquema que sigue la ventana que va a ser estudiada se muestra a continuación con algunos de los datos y nomenclaturas, donde ambos vidrios poseen las mismas características.

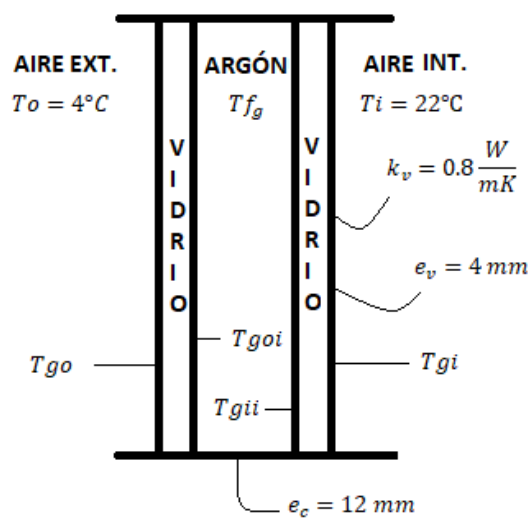


Figura 20. Diseño de la ventana a estudiar.

El gas utilizado en la configuración de la ventana del trabajo es el argón, aunque posteriormente se lleven a cabo los mismos cálculos con otros gases. Las demás temperaturas desconocidas se obtienen mediante la iteración de los cálculos para conocer el flujo de calor, y las resistencias que suponen los vidrios y los gases.

Se utiliza la hipótesis de flujo de calor uniforme, ya que es el modelo que más se aproxima a la realidad con sus resultados, como así se demostró en la bibliografía [1], pero posteriormente, se calcula mediante la realización de la hipótesis de temperatura de la superficie constante para poder conocer sus diferencias y saber cuál es más próximo al modelo experimental.

La altura de la ventana es de 40 cm, pero también se van a proporcionar en el apartado 5 los resultados con otras medidas para poder llevar a cabo una comparación entre ambas.

4.1. Ambientes exterior e interior

Las temperaturas del ambiente son consideradas las mismas que las dadas en el artículo en el que está basado el trabajo, de esta manera se podrán realizar comparaciones fácilmente entre ambos resultados.

$$T_i = 22^{\circ}\text{C}$$

$$T_o = 4^{\circ}\text{C}$$

Una vez obtenidos los resultados correspondientes a dichas temperaturas, estas son modificadas a lo largo del trabajo para poder conocer su influencia sobre las características térmicas de la ventana.

No es posible conocer aún los coeficientes de convección del aire en ambos lados, pues es necesario su previo cálculo mediante iteraciones, las nomenclaturas utilizadas para estos parámetros son:

$$\text{Coeficientes de convección interior} \equiv h_i \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$$

$$\text{Coeficientes de convección exterior} \equiv h_o \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$$

4.2. Acristalamiento

Los datos relacionados con los cristales de la ventana son tanto la temperatura de todas las superficies como la conductividad del vidrio, tomando para esta última el valor encontrado en la literatura [6], pero se ha comprobado que su variación no es significativa en el resultado final.

$$k_v = 0.8 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

El espesor de ambos cristales es el mismo, ya que sigue la configuración 4-12-4, es decir, los vidrios son de 4 mm de espesor y la cavidad interior de 12 mm.

$$e_c = 12 \text{ mm}$$

$$e_v = 4 \text{ mm}$$

Para el cálculo de las temperaturas se utiliza la expresión básica de la transferencia de calor por convección, pero como es necesario el cálculo previo de los coeficientes y del flujo de calor, se adjuntan las expresiones que hacen posible su cálculo:

$$q'' = h \times \Delta T [W/m^2]$$

Se despeja la variación de temperatura de la ecuación anterior, de esta manera conoceremos las temperaturas de las superficies exteriores de ambos cristales.

$$T_{gi} = T_i - \frac{q''}{h_i}$$

$$T_{go} = T_o + \frac{q''}{h_o}$$

Para la parte interior, se sabe que el calor se transfiere por conducción a través del vidrio y la temperatura se obtiene de las siguientes ecuaciones:

$$T_{gii} = T_{gi} - q'' \times \frac{e_v}{k_v}$$

$$T_{goi} = T_{go} + q'' \times \frac{e_v}{k_v}$$

4.3. Gas en la cavidad.

Todas las propiedades de los gases que intervienen se calculan mediante la aplicación de Matlab CoolProp, para ello es necesario conocer la temperatura a la que se encuentran, ya que las propiedades varían con esta, la temperatura a la que se calculan se obtiene mediante la media de las temperaturas de ambos cristales, se puede realizar tanto con la parte exterior como la interior, para mayor precisión se utilizan estas últimas:

$$T_{fg} = \frac{T_{gii} + T_{goi}}{2}$$

5. Resultados

Como se ha visto a lo largo del trabajo, son varios los resultados que se van a mostrar en este apartado. Partiendo del programa creado a partir de software ‘Matlab’ mediante bucles de iteración, se obtienen los valores de las temperaturas a lo largo de la ventana mediante la expresión obtenida anteriormente. Pero para ello, primero se han debido obtener otros datos necesarios, como los coeficientes de convección y temperaturas de superficie y con estos conocer el flujo de calor. Una vez obtenida la distribución de temperatura del trabajo, se procede a comparar con los resultados aportados en “Free convection analysis of a window cavity and its longitudinal temperature profile” [6]. Finalmente, con todos los resultados obtenidos, se realizan variaciones del caso principal que serán detalladas en este apartado.

5.1 Flujo de calor constante.

Con las diferentes suposiciones sobre el flujo de calor que atraviesa la ventana, se deben utilizar correlaciones apropiadas a cada situación. Primeramente, el caso a estudiar es el de flujo de calor constante, se muestra cómo se han obtenido los resultados y qué correlaciones han de utilizarse con los datos que se adecuan al problema.

5.1.1 Resultados iniciales.

En este apartado se dan los datos de temperaturas, flujo de calor, transmitancia térmica y propiedades de los gases calculados, que verdaderamente se ajustan al caso estudiado.

$$q'' = 36.78 \frac{W}{m^2}$$

$$T_{gi} = 290.117 K = 17.117 ^\circ C$$

$$T_{go} = 279.19 K = 6.19 ^\circ C$$

Las propiedades del aire se calculan a la temperatura media entre la de la superficie exterior de los cristales y la del ambiente en ambos casos; y la del argón haciendo la media entre las temperaturas de los cristales calculadas anteriormente:

Gas	Temperatura Media (K)	Difusividad térmica (m ² /s)	Densidad (kg/m ³)	Conductividad (W/mK)	Viscosidad (Kg/ms)	Calor específico (J/KgK)	Prandtl (adimensional)
Aire interior	292.54	2.1267e-05	1.2071	0.0258	1.8176e-05	1.0061e+03	0.7080
Aire exterior	277.95	1.9348e-05	1.2707	0.0247	1.7458e-05	1.0058e+03	0.7101
Argón	284.6	1.9096e-05	1.7125	0.0171	2.1752e-05	521.7046	0.6652

Tabla 1. Propiedades del aire y argón en la cavidad con flujo de calor constante.

5.1.2. Coeficientes de transferencia de calor por convección

Para poder obtener los coeficientes de convección en el interior, exterior y cavidad se necesitan correlaciones adecuadas para los distintos casos. A continuación, se aportan las correlaciones que utilizadas y su posterior resultado.

A. Lado interior de la ventana

Para el lado interior de la ventana, el correspondiente a la vivienda, se utilizan las correlaciones encontradas en “*Fundamentos de transferencia de calor*” de Frank P. Incropera [5]. Para la convección libre en flujo externo sobre pared vertical depende únicamente del número de Rayleigh:

$$Nu = \frac{h \times H}{k} = C \times Ra_H^n$$

Siendo C y n constantes que dependen del **número de Rayleigh**:

$$C = 0.59, \quad n = \frac{1}{4}, \quad \text{si } 10^4 \leq Ra_H \leq 10^9$$

$$C = 0.1, \quad n = \frac{1}{3}, \quad \text{si } 10^9 \leq Ra_H \leq 10^{13}$$

Para flujo de calor constante, en [6] se propone definir el número de Rayleigh en términos de la diferencia de temperatura en mitad de la placa vertical, es decir, la variación de temperatura utilizada es:

$$\Delta T_{H/2} = T_i - T_{gi} \times (H/2)$$

$$Ra_H = \frac{g \times \beta \times \Delta T_{H/2} \times Lc^3}{\alpha \times \nu}$$

$$Ra_H = 1.5881e + 09$$

Siendo el valor de Ra el mostrado anteriormente, se aplica el segundo caso por cumplir mejor la condición, pero si se aplicara el otro, el valor final no variaría notoriamente.

Por lo tanto, el resultado final del coeficiente de transferencia de calor por convección en el interior es:

$$hi = 7.5336 \frac{W}{m^2K}$$

B. Lado exterior de la ventana

En el exterior de la ventana, no se supone convección natural sino forzada por la acción del viento. Como ya se ha informado anteriormente, se utiliza el dato de la velocidad dado por el Código Técnico de la Edificación; con dicho dato se calcula el valor del **número de Reynolds** ya que es necesario para conocer el comportamiento del flujo de aire y así saber que correlación es la que se debe utilizar. Del libro “*Transferencia de calor y masa*” de Çengel, Yunus A [23]:

- Régimen laminar si $Re < 5 \times 10^5$

$$Nu = 0.906 \times Re^{1/2} \times Pr^{1/3}$$

- Régimen turbulento si $Re > 10^7$

$$Nu = 0.0385 \times Re^{4/5} \times Pr^{1/3}$$

- Condiciones mixtas: si $10^5 < Re < 10^7$

$$Nu = (0.039 \times Re^{\frac{4}{5}} - 755) \times Pr^{1/3}$$

El valor del número de Re se calcula de la siguiente manera y su resultado es:

$$Re = \frac{\rho H v}{\mu}$$

$$Re = 1.5139e + 05$$

El flujo es laminar y el resultado del coeficiente de convección en flujo externo es el siguiente:

$$h_o = 19.4413 \frac{W}{m^2K}$$

C. Cavidad interior.

El cálculo del coeficiente de transferencia de calor para el gas de la cavidad interior se realiza mediante una correlación dada en [1], que es la que mejor se ajusta a las condiciones y medidas dadas.

$$Nu = 0.25 \times Ra_H^{2/7} \times \left(\frac{H}{L}\right)^{1/7}$$

$$h_g = 3.38 \frac{W}{m^2K}$$

Con todos los coeficientes de transferencia de calor calculados a partir de los datos propios del problema, se obtiene el valor de la **transmitancia térmica**:

$$R_{térmica} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_g} + \frac{2 \times ec}{kc}$$

$$U_{ref} = \frac{1}{R_{térmica}} = 2.0436 \frac{W}{m^2K}$$

5.1.3. Cálculo de las constantes c y m

Los únicos parámetros por calcular de la expresión de la temperatura son las constantes c y m; los cuales ya se ha explicado cómo obtenerlos, pero aquí se muestran los resultados y la diferencia con los que han sido dados.

Mediante la regresión lineal de la siguiente expresión se obtienen los valores de las constantes c y m:

$$\log(Na) = \log(c) + m \times [Ra_H \times Pr]$$

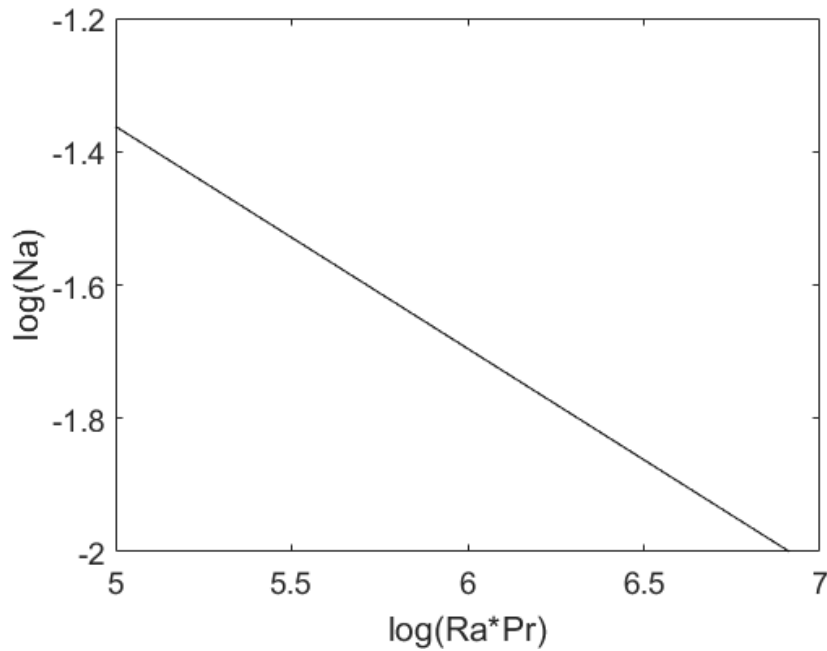


Figura 21. Gráfica $\log(Na)$ frente a $\log(Ra*Pr)$

$$m = -0.33$$

$$c = 2.016$$

Estos valores finales de las constantes se encuentran muy lejos de los resultados que deberían dar. Para intentar conocer el error o el porqué de la diferencia, se decide utilizar el valor dado de c en una ventana con las características de la Figura 16 para comprobar qué valor de m se obtiene mediante el método de sustitución en la ecuación:

$$c = 0.43$$

$$m = -0.233$$

El valor que debería resultar ($m = -0.24$) es cercano al obtenido y se comprueba como los datos son correctos pero el método de la regresión lineal anterior es erróneo.

Se desea conocer la relación existente entre la constante c y la transmitancia térmica, ya que se ha visto como c es el único parámetro que depende del tipo de ventana estudiado, y, por lo tanto, de la U_{ref} propia de cada ventana.

$$c = c_0 + c_1 \times U_{ref}$$

Esta dependencia lineal muestra cómo se pueden hallar las constantes c_0 y c_1 mediante una nueva regresión lineal.

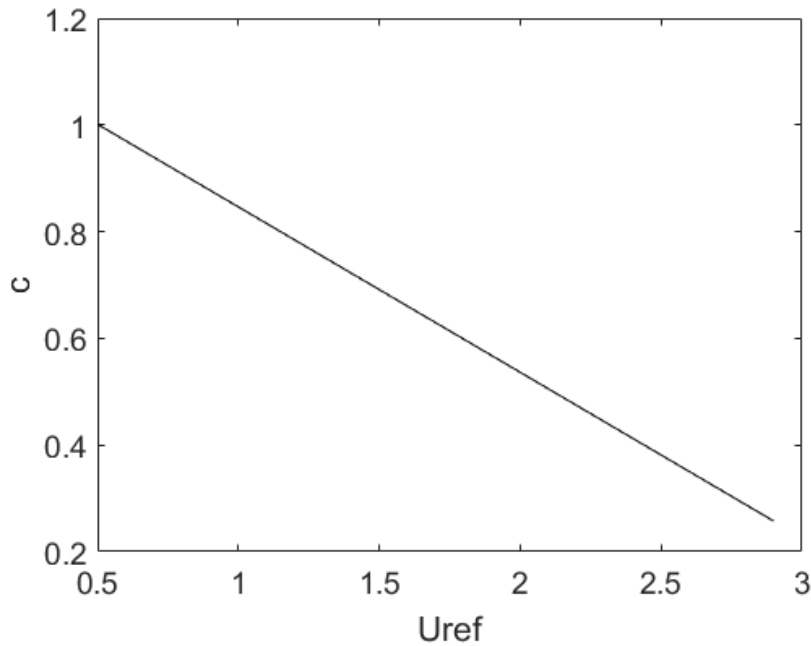


Figura 22. Gráfica de la constante c frente a U_{ref}

$$c_0 = 0.7333$$

$$c_1 = -0.1667$$

El valor de la constante c final se calcula con la expresión dada en función de la transmitancia térmica:

$$c = 0.7333 - 0.1667 \times 2.0436 = 0.39$$

A pesar de ser un valor próximo al correspondiente de una ventana de argón con la configuración 4-12-4, se observa como existe otro valor válido dado por la literatura para este tipo de ventanas (0.91) y mediante la comprobación y prueba de varios valores de la constante, el 0.91 resulta más acertado. Para m se utiliza el valor conseguido teóricamente de 0.2 ya que es muy próximo a todo tipo de ventana y es el valor medio de la constante.

5.1.4. Cálculo de la distribución longitudinal de temperatura.

Con los parámetros necesarios en la expresión de la temperatura conocidos, se procede al cálculo de la temperatura en diferentes puntos de la ventana. Para ello se crea un

vector con cada altura a la que se quiere conocer el dato de la temperatura, y de esta manera se obtendrá la variación buscada.

$$T = T_f + \frac{q'' \times H \times c}{k} \times \left[\frac{g \times \beta \times H^4 \times q'' \times \text{Pr}}{\alpha \times k \times v} \right]^m$$

Tomando como vector de altura desde 0.05 m hasta el valor máximo de 0.4 m tomando valores cada 0.05 m:

$$Hv = (0.05; 0.1; 0.15; 0.2; 0.25; 0.3; 0.35; 0.4)$$

El vector resultante de temperaturas en la ventana interior de su zona interna es:

$$T_{gii} = (17.55; 18.42; 18.99; 19.43; 19.79; 20.09; 20.35; 20.59)$$

Finalmente, se grafican ambos vectores anteriormente mostrados para conocer la distribución de la temperatura en función de la altura de la ventana:

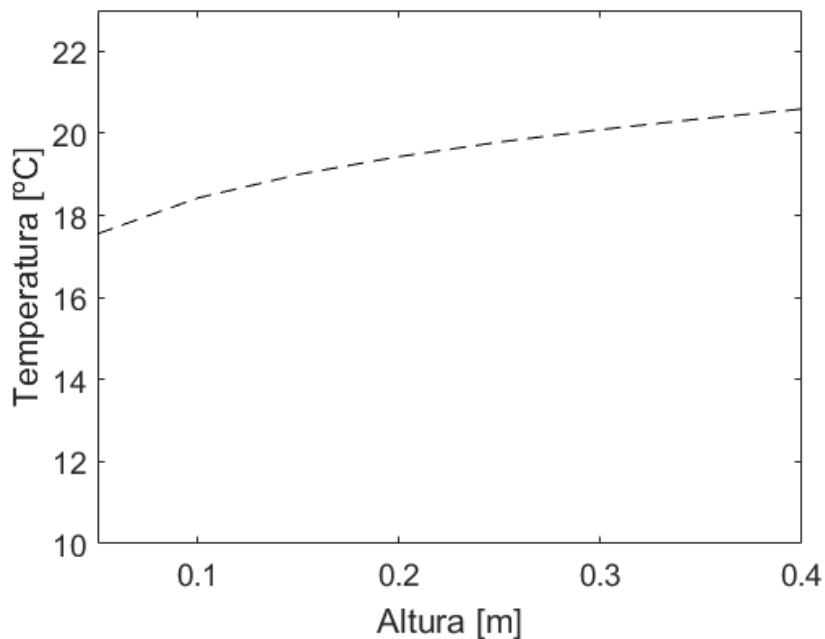


Figura 23. Gráfica de la temperatura 'Tgii' frente a la altura (Flujo de calor constante)

Con la gráfica adjunta se puede comprobar como sí crece la temperatura longitudinalmente con la altura como demostraban N. Abodahab y T. Munner en su estudio, y si se comparan los resultados de la Figura 23 con la Figura 25, se puede afirmar que la distribución de temperaturas es similar en ambos gráficos.

5.2. Temperatura de la superficie uniforme.

Aunque se conoce que el modelo de flujo de calor constante es válido, se realizan los mismos cálculos para el caso de temperatura de la superficie del cristal uniforme. Esto facilitará la comparación posterior entre ambos métodos.

5.2.1 Resultados iniciales.

Como en el apartado anterior, se aportan los datos calculados inicialmente necesarios para calcular los demás parámetros, en este caso son:

$$q'' = 16.22 \frac{W}{m^2}$$

$$T_{gi} = 289.56 K = 16.56 ^\circ C$$

$$T_{go} = 277.96 K = 4.96 ^\circ C$$

Con estas temperaturas ya se pueden conocer las propiedades de los gases que intervienen en el estudio, mediante las temperaturas medias en cada parte de la ventana se pueden obtener los siguientes valores que aporta CoolProp de Matlab:

Gas	Temperatura Media (K)	Difusividad térmica (m ² /s)	Densidad (kg/m ³)	Conductividad (W/mK)	Viscosidad (Kg/ms)	Calor específico (J/KgK)	Prandtl (adimensional)
Aire interior	292.18	2.1219e-05	1.2086	0.0258	1.8159e-05	1.0061e+03	0.7081
Aire exterior	277.47	1.9287e-05	1.2728	0.0247	1.7434e-05	1.0058e+03	0.7102
Argón	283.66	1.8992e-05	1.7176	0.0170	2.1699e-05	521.7145	0.6652

Tabla 2. Propiedades del aire y argón en la cavidad con la temperatura de la superficie uniforme

Los datos anteriores son muy próximos a los del cuadro anterior en flujo de calor constante, las propiedades de los gases son prácticamente iguales con las pequeñas variaciones de temperatura existentes.

5.2.2. Coeficientes de transferencia de calor por convección

Para el caso de temperatura uniforme, se debe utilizar correlaciones diferentes a las usadas anteriormente en función de cómo sea la convección. El objetivo es la obtención de la transmitancia térmica mediante el cálculo de los coeficientes de convección.

A. Lado interior de la ventana

Para el lado interior de la ventana se utilizan las mismas correlaciones del apartado 5.1.2, es decir, las encontradas en [5]. Por lo tanto, vuelve a ser necesario el cálculo del número de Rayleigh:

$$Nu = \frac{h \times H}{k} = C \times Ra_H^n$$

Siendo C y n constantes que dependen del número de Rayleigh:

$$C = 0.59, \quad n = \frac{1}{4}, \quad \text{si } 10^4 \leq Ra_H \leq 10^9$$

$$C = 0.1, \quad n = \frac{1}{3}, \quad \text{si } 10^9 \leq Ra_H \leq 10^{13}$$

El número de Rayleigh se calcula mediante la ecuación que se muestra a continuación, no se utiliza la misma variación de temperatura que en el caso anterior:

$$Ra_H = \frac{g \times \beta \times (T_i - T_{gi}) \times H^3}{\alpha \times \nu}$$

$$Ra_H = 3.7951e + 07$$

Por lo tanto, el valor final del coeficiente de transferencia de calor por convección en el interior es:

$$h_i = 2.9871 \frac{W}{m^2 K}$$

B. Lado exterior de la ventana

En este apartado en el que predomina la convección forzada se utiliza el valor de velocidad de [30]. Las correlaciones para conseguir el coeficiente de convección forzada se encuentran en cualquier libro sobre la transferencia de calor [5]

- Régimen laminar si $Re < 5 \times 10^5$

$$Nu = 0.664 \times Re^{1/2} \times Pr^{1/3}$$

- Régimen turbulento si $Re > 10^7$

$$Nu = 0.037 \times Re^{4/5} \times Pr^{1/3}$$

- Condiciones mixtas: si $10^5 < Re < 10^7$

$$Nu = (0.037 \times Re^{4/5} - 871) \times Pr^{1/3}$$

El valor del número de Re se calcula de la siguiente manera y su resultado es:

$$Re = \frac{\rho H v}{\mu}$$

$$Re = 2.1084e + 05$$

El flujo es laminar y el resultado del coeficiente de convección por flujo externo es el siguiente:

$$h_o = 16.7911 \frac{W}{m^2 K}$$

C. Cavidad interior.

Existe gran número de correlaciones para convección natural de un gas encerrado en una cavidad, pero están condicionadas por la relación entre la altura y el espesor de la misma, por el número adimensional Prandtl y por el número de Rayleigh. Con las condiciones y dimensiones dadas, se limitan las correlaciones que puede cumplir y la única que cumple las condiciones pedidas es la correlación de la transferencia de calor por conducción, esto significa que el gas se encuentra parado dentro de la cavidad y no se produce movimiento ascendente por variación de temperatura:

La condición para que se cumpla conducción depende de Rayleigh en función del espesor de la cavidad (ev):

$$Ra_{ev} \times \left(\frac{ev}{H}\right) < 100$$

$$Ra_{ev} = \frac{g \times \beta \times (T_{gii} - T_{goi}) \times ev^3}{\alpha \times \nu} = 2.8033e + 03$$

Se cumple la condición requerida y al ser transferencia de calor por conducción, el valor del coeficiente de convección se calcula con la siguiente fórmula:

$$hg = \frac{kg}{ev}$$

$$hg = 1.4182 \frac{W}{m^2 K}$$

Con todos los coeficientes de transferencia de calor calculados a partir de los datos propios del problema, se obtiene el valor de la **transmitancia térmica**:

$$R_{térmica} = \frac{1}{hi} + \frac{1}{ho} + \frac{1}{hg} + \frac{2 \times ec}{kc}$$

$$U_{ref} = \frac{1}{R_{térmica}} = 0.9014 \frac{W}{m^2 K}$$

5.2.3. Cálculo de la distribución longitudinal de temperatura.

Con los parámetros necesarios de la expresión de la temperatura conocidos, y utilizando las mismas constantes m y c que en el caso anterior, se procede al cálculo de la temperatura en diferentes puntos de la ventana, para ello se crea un vector con cada altura a la que se quiere conocer el dato de la temperatura, y de esta manera se obtendrá la variación buscada.

Tomando como vector de altura desde de 0.05 m hasta el valor máximo de 0.4 m tomando valores cada 0.05 m:

$$Hv = (0.05; 0.1; 0.15; 0.2; 0.25; 0.3; 0.35; 0.4)$$

El vector resultante de temperaturas:

$$T = (13.71; 14.15; 14.44; 14.66; 14.83; 14.98; 15.12; 15.23)$$

Finalmente, se grafican ambos vectores anteriormente mostrados.

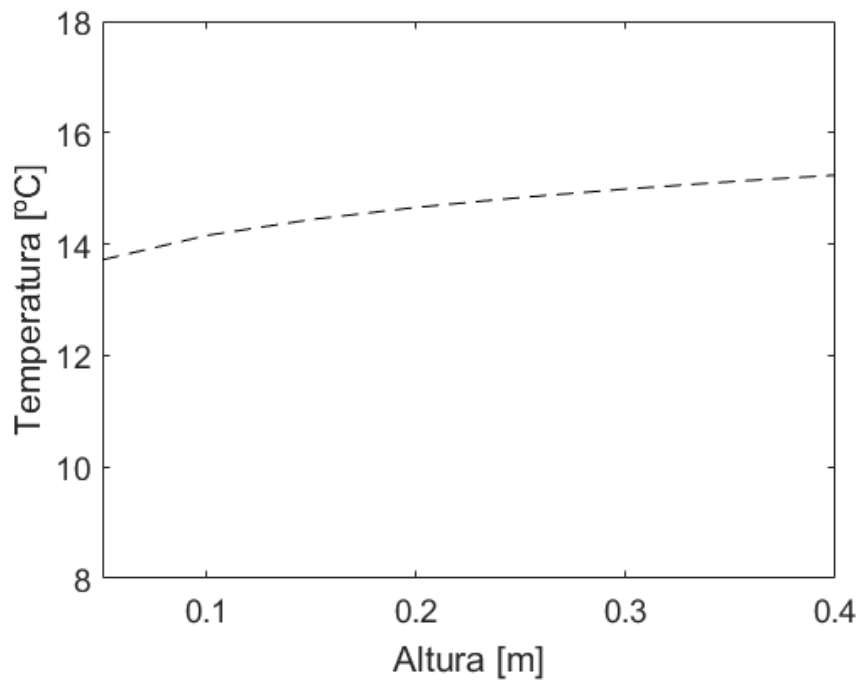


Figura 24. Gráfica de la temperatura 'Tgii' frente a altura (Temperatura de la superficie uniforme)

En la Figura 24 se observa que la distribución de temperatura no posee la misma pendiente que la Figura 23 con flujo de calor constante. La temperatura en lo alto de la ventana no crece tanto como el otro caso estudiado, este hecho se debe al método por el que se transfiere calor a través de la cavidad, ya que se han utilizado correlaciones para conducción. Por lo tanto, al predominar la conducción frente a la convección, el argón se encuentra estacionario y no se produce un aumento de temperatura debido al movimiento ascendente del gas.

A su vez, la temperatura a la que se encuentra el vidrio es menor que si se diera convección natural, es decir, implica una mejora en las propiedades aislantes de la ventana, aumenta la resistencia térmica frente al paso de calor.

En otro apartado del trabajo se realiza un estudio sobre el método de transferencia de calor dado en la cavidad y su influencia sobre la transmitancia térmica de la ventana y el flujo de calor que se pierde a través de la misma.

Finalmente, se concluye que este modelo en el que se supone la temperatura de la superficie uniforme no es correcto, ya que si la temperatura exterior del cristal interior es constante no es posible que exista un aumento de temperatura en la parte interior del mismo cristal como se ha graficado, ya que deberían coexistir varios flujos de calor diferentes a la misma vez en cada altura de la ventana, por lo tanto este modelo se considera erróneo.

5.3. Comparativa con la literatura.

El trabajo realizado por los científicos ingleses N. Abodahab y T. Munner en 1997 [6], centra la atención en concluir que la temperatura aumenta longitudinalmente en una ventana de doble acristalamiento debido a la convección natural del gas interior.

En la Figura 25 se muestran los resultados de la literatura para una ventana con argón en la cavidad y una configuración de 4-12-4.

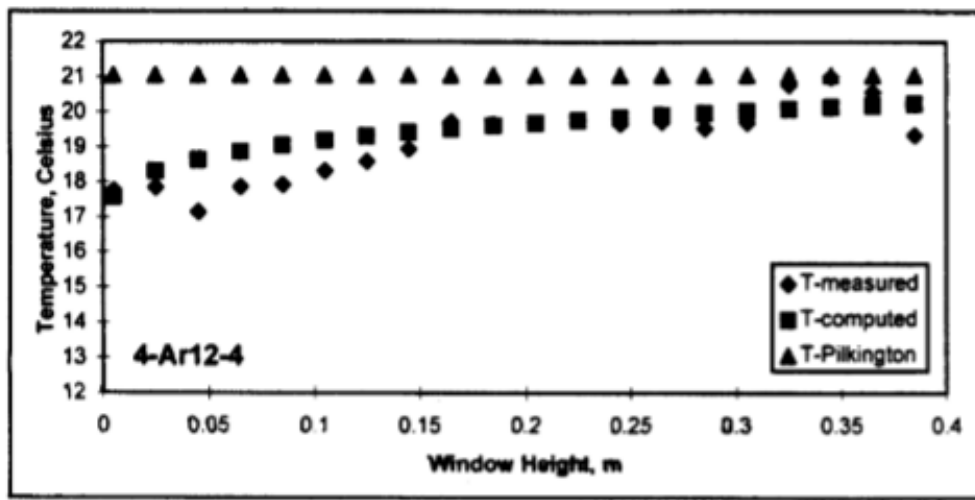


Figura 25. Gráfica de temperatura frente a altura (Resultado T. Munner con argón) [6]

En la Figura 25 se demuestra que la temperatura crece desde los 17°C, en la parte inferior del vidrio interior, hasta los 20.5°C de la zona más alta de la ventana, coincidiendo con los valores de las medidas experimentales.

En un principio, este trabajo se orienta a reproducir los resultados de dicho estudio, por lo tanto, con temperaturas de 4°C en el interior y 22°C en el exterior, siguiendo los pasos descritos por los autores, resulta un vector de temperaturas que crece desde 17.5°C a 20.5°C para la suposición de flujo de calor constante. Por lo tanto, a pesar de la diferencia en las técnicas matemáticas de obtención de resultados, se consigue igualar correctamente la gráfica final de temperaturas en función de la altura de una ventana de 0.4 m. y se puede concluir que ambos resultados coinciden.

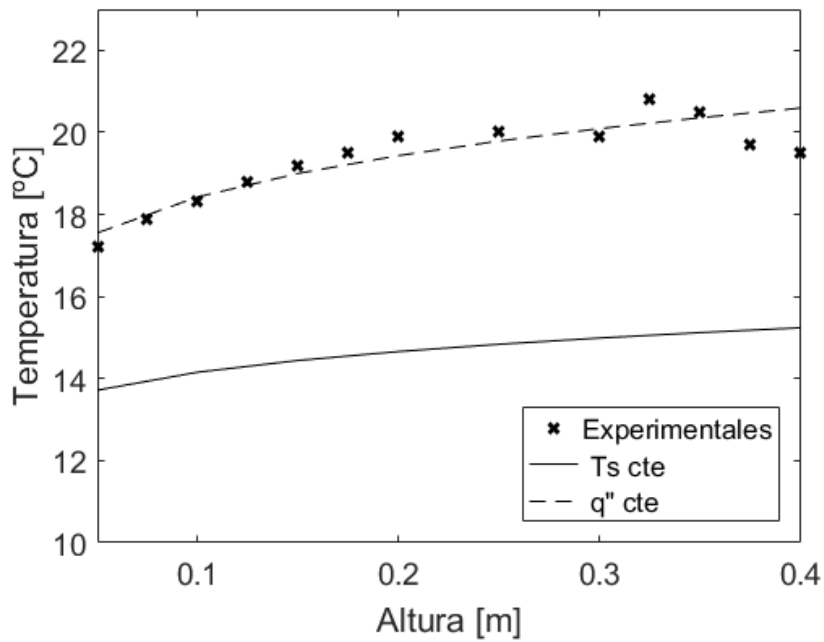


Figura 26. Comparativa entre los modelos q'' cte, T_s cte y las medidas experimentales de [6]

En la Figura 26 se comparan los modelos de flujo de calor constante y temperatura de la superficie uniforme con las medidas experimentales de [6]. Se puede afirmar que el modelo de flujo de calor constante coincide con los datos medidos experimentalmente y así con los resultados de la Figura 25. Por lo tanto, se confirma la validez del modelo con flujo de calor constante, ya que los resultados son correctos y coinciden con la literatura.

5.4. Estudio de la influencia de otros parámetros.

Una vez validado el modelo de flujo de calor constante, se realizan variaciones del mismo para conocer la influencia de algunos parámetros que intervienen en el problema, como el gas utilizado en el interior de la cavidad, la temperatura exterior, la altura de la ventana y la configuración de espesores de la ventana.

5.4.1 Influencia de la temperatura exterior.

La temperatura exterior es uno de los parámetros más influyentes en la pérdida de calor, pues interfiere directamente en la expresión que relaciona el flujo de calor con la resistencia térmica.

Se van a comparar distintos resultados que han sido calculados variando la temperatura exterior, son 3 los casos estudiados y se comparan directamente con los resultados dados del caso principal:

- Temperatura extrema: $T_o = -10^{\circ}\text{C}$
- Temperatura de verano: $T_o = 35^{\circ}\text{C}$
- Temperatura para el cálculo de la condensación $T_o = 0^{\circ}\text{C}$
- Problema principal: $T_o = 4^{\circ}\text{C}$

Las situaciones más extremas de temperatura modifican fuertemente las condiciones del cristal interior de la vivienda, pudiendo producir condensación con mayor facilidad, por esta razón se estudia la **situación extrema de temperatura** exterior. Se supone una nueva temperatura exterior de -10°C , ya que según el Instituto de Estadística [22] se ha alcanzado dicha temperatura en varias ocasiones en la Comunidad de Madrid, como en enero de 1985 en la estación meteorológica de Getafe o cualquier año en la de Navacerrada.

La distribución de temperatura resultante será de utilidad para conocer la condensación de este caso estudiado en apartados posteriores:

$$T = (13.39; 14.88; 15.85; 16.59; 17.19; 17.70; 18.15; 18.55)$$

Con temperaturas de **verano** la posibilidad de que se produzca condensación es muy pequeña, pero al existir diferencia de temperatura entre el exterior y el interior se produce un flujo de calor en sentido contrario al estudiado hasta ahora, la vivienda recibe calor desde el ambiente exterior. Al igual que en otras estaciones del año, se intenta que el flujo en transición sea el mínimo posible, ya que se pretende mantener un ambiente interior a una temperatura adecuada para la comodidad de los ocupantes y recibir dicho calor supone pérdidas energéticas y económicas. Se resuelve este apartado para conocer cuál es el flujo de calor perdido por la ventana y qué resistencia opone el doble acristalamiento con argón en el interior cuando la temperatura exterior es mayor que la interior.

Para unas condiciones de diseño interiores, según el Reglamento de Instalaciones Térmicas en Viviendas (RITE) [28], la temperatura interior debe estar comprendida entre los valores dados en la Figura 33. La temperatura exterior se toma

aproximadamente la media máxima de los últimos años en varias estaciones meteorológicas de la Comunidad de Madrid, según la Agencia Estatal de Meteorología (AEMet) [12]:

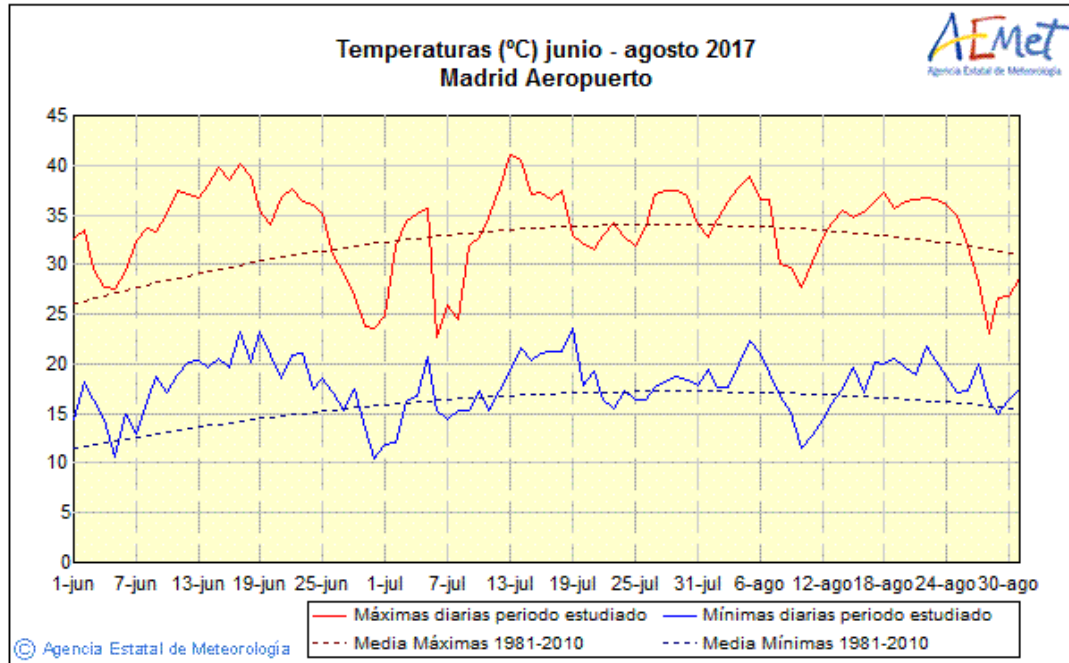


Figura 27. Temperaturas medias máximas y mínimas de verano [12]

Por último, se considera también el valor de 0°C , el cual será de utilidad para uno de los siguientes apartados en el que se calculará la condensación de la ventana.

En la tabla 3 se reúnen los resultados de todos los casos descritos anteriormente para conocer la influencia de las variaciones de temperatura exterior sobre el flujo de calor y la resistencia de la ventana.

	$h_i \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$	$h_o \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$	$h_g \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$	$U_{\text{ref}} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$	$q'' \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$
$T_o = 35^{\circ}\text{C}$	7.47	19.31	2.97	1.88	-22.56
$T_o = 4^{\circ}\text{C}$	7.53	19.44	3.38	2.04	36.78
$T_o = 0^{\circ}\text{C}$	7.54	19.45	3.57	2.11	46.46
$T_o = -10^{\circ}\text{C}$	7.58	19.49	3.96	2.24	71.87

Tabla 3. Comparativa entre los resultados de utilizar diferentes temperaturas exteriores.

Como se puede apreciar en la tabla 3 adjunta, la temperatura del ambiente exterior no hace modificar significativamente los valores de los coeficientes de convección a ninguno de los dos lados, pero sí hace variar el coeficiente de convección natural de la

cavidad lo suficiente como para que se vea reflejado en la transmitancia térmica en cada caso.

En cambio, la influencia es máxima sobre el calor perdido a través de la ventana, pues el flujo aumenta considerablemente a medida que la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior se incrementa.

Por cada grado exterior de diferencia con el caso principal, el flujo de calor perdido aumenta casi $2.5 \frac{W}{m^2}$, llegando a aumentar hasta un 95.7 % cuando en el exterior se da una condición extrema de temperatura.

Se sabe que el aumento del flujo de calor perdido a través del hueco conlleva una disminución de la temperatura del vidrio interior, y con ello mayor posibilidad de condensación en el interior de la sala. En el siguiente gráfico se muestra la distribución de temperatura en dicho cristal para las distintas condiciones del exterior estudiadas.

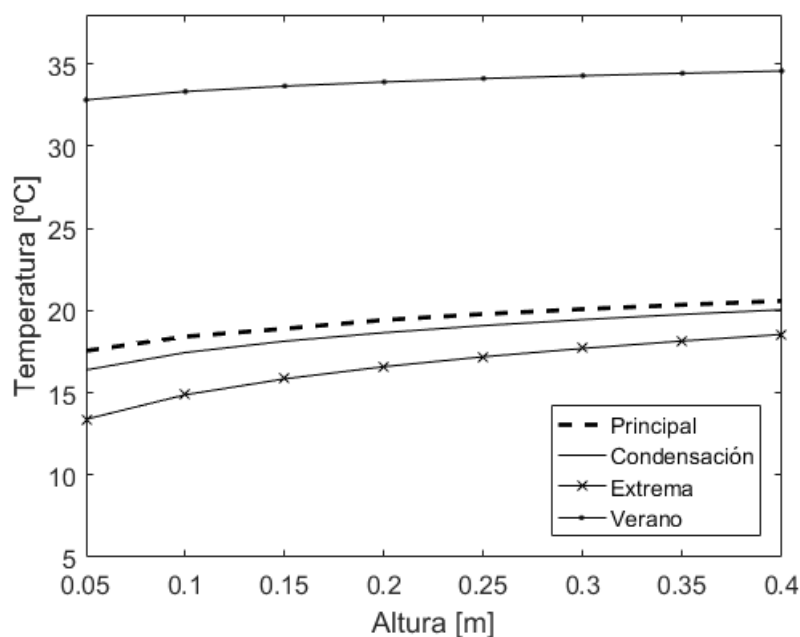


Figura 28. Distribución de temperatura del cristal interior en la cavidad 'Tgii' comparando temperaturas exteriores

5.4.2. Influencia del gas utilizado en el interior de la cavidad.

Las ventanas más utilizadas y vendidas en el mercado son las que contienen aire en la cavidad, debido a la ventaja económica que supone la utilización de aire en lugar de gases nobles como argón, kriptón o xenón, y la abundancia del mismo en el ambiente.

Se vuelve a obtener resultados del caso validado anterior variando el gas que se encuentra en el interior de la cavidad, es decir, se realiza mediante la suposición de flujo de calor constante, pues es la más acertada.

Los gases a comparar en este apartado del trabajo serán aire, xenón y nitrógeno junto con el estudio previo con el argón. En la tabla 4 se muestran los resultados del coeficiente de convección del gas, la transmitancia térmica y el flujo de calor.

	Coeficiente de convección $hg \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$	Transmitancia térmica $U_{ref} \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$	Flujo de calor $q'' \left[\frac{W}{m^2} \right]$
Aire	4.58	2.42	43.56
Nitrógeno	4.54	2.41	43.45
Argón	3.38	2.04	36.76
Xenón	1.73	1.29	23.33

Tabla 4. Comparativa entre los resultados de diferentes gases.

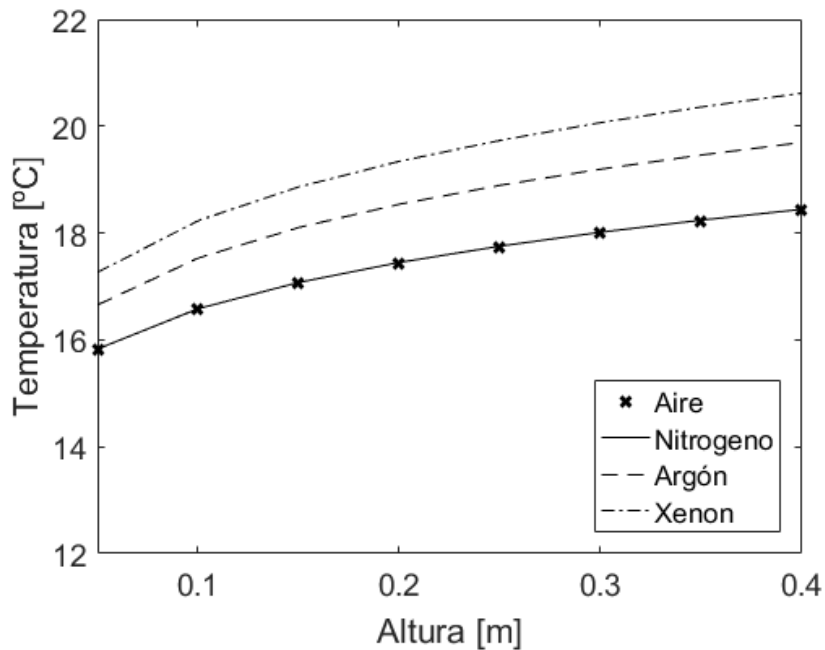


Figura 29. Distribución de temperatura del cristal interior en la cavidad 'Tgii' comparando gases

Como se observa en una ventana con cavidad interior (Figura 29), el gas elegido para ocupar la cámara interior influye notablemente sobre los resultados, pues de ello depende, junto a otros factores, la capacidad de aislar térmicamente la ventana.

El gas con menor conductividad térmica aporta mejores propiedades al conjunto de la ventana, se consigue menor coeficiente de transmisión de calor y un efecto aislante mayor. El xenón es el gas con mayor capacidad resistente ante el paso de calor, y por

ello es el que mantiene a mayor temperatura el cristal de la ventana en la zona interior y supone mayor dificultad para que se produzca condensación. Las distribuciones de temperatura del aire y nitrógeno coinciden en todos sus puntos, pues sus valores de transmitancia térmica son similares, esto se debe a que el aire contiene un 78.09% de nitrógeno en su composición.

Una vez conocida la transmitancia térmica, se deben tener en cuenta otros factores importantes al elegir un gas para dichas funciones, pues la diferencia económica es notable, al igual que la manejabilidad de los distintos gases, su obtención o almacenamiento. Estas son las razones por las que aún el aire es el gas más utilizado para la cavidad interior, aunque se encuentra en crecimiento el uso e investigación de otros gases como los estudiados en este trabajo.

5.4.3. Influencia del espesor y la altura para el método de transferencia de calor en la cavidad.

Los primeros resultados dados se obtuvieron con una ventana de tan solo 0.4 m de altura con el objetivo de facilitar las comparaciones con la ventana del artículo en el que se basa este trabajo [6]. Pero se desea conocer la influencia que tiene la altura de la ventana en el proceso de transferencia de calor por convección, tanto en los exteriores como en la cavidad. Por ello, se realizan los cálculos con una ventana del doble de altura, y para poder conocer la influencia de este parámetro sobre la transmitancia térmica final de la ventana se obtienen los resultados siguientes:

	$h_i \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$	$h_o \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$	$h_g \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$	$U_{ref} \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$	$q'' \left[\frac{W}{m^2} \right]$
$H = 0.4 \text{ m}$	7.53	19.44	3.38	2.04	36.72
$H = 0.8 \text{ m}$	6.83	13.74	1.42	1.07	19.33

Tabla 5. Comparativa entre los resultados para diferente altura de la ventana.

Tras el cálculo de los parámetros anteriores se observa gran diferencia entre los resultados con la mitad de altura. Se comprueba como el aumento de la altura afecta a los coeficientes de convección y disminuye en gran medida la transmitancia térmica de la ventana.

A continuación, se adjunta la gráfica de la distribución de temperaturas en la zona de la cavidad de la ventana interior (Figura 30).

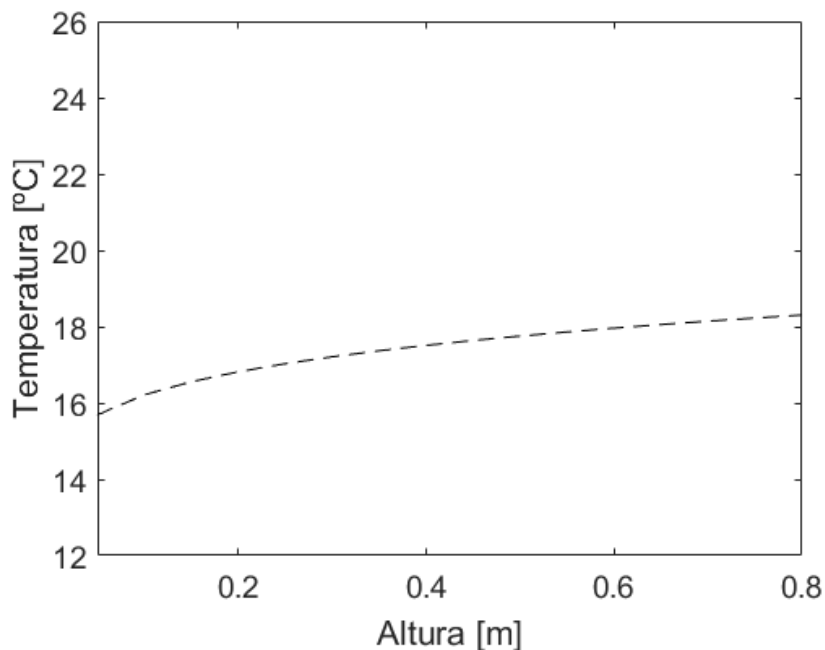


Figura 30. Gráfica de temperatura 'Tgii' frente a la altura (Altura de 0.8 m)

En la Figura 30 se observa como la pendiente es menor a la obtenida con una altura de 0.4 m., esto muestra cómo el efecto de la convección natural en la cavidad ya no es determinante, por lo tanto, se estudiarán más medidas comparativas entre las alturas para conocer con más detalle lo ocurrido en la transferencia de calor.

También se estudia la influencia del espesor de la cavidad sobre la transferencia de calor existente y la resistencia ante el paso de calor.

El caso térmicamente óptimo es en el cual se produce conducción a través del gas encerrado entre los paneles de vidrio debido a la baja conductividad de los gases, es por este motivo que se estudie una ventana de características similares en las que se cumpla conducción y poder conocer las diferencias entre sus resultados.

Con los datos que se ha calculado el resto del trabajo no es posible aplicar ninguna correlación en la que se cumpla la transferencia de calor por conducción, ya que esta solo varía con el número de Rayleigh basado en el espesor de cavidad. Por lo tanto, se estudian diversos casos variando el espesor, para finalmente conocer el límite para que se cumpla un modo de transferencia de calor u otro.

La condición para cumplimentar la correlación de la transferencia de calor por conducción es:

$$Ra_{ev} < 10^3 \parallel (Ra_{g_ev2} \times (ev/H) < 100)$$

A partir de valores mayores al dado en la condición anterior comienza a transferirse calor por convección con los cambios que ello conlleva.

En la siguiente tabla, se representan los resultados obtenidos del coeficiente de convección del gas interior y de la transmitancia térmica para diferentes valores de altura y espesor de la cavidad:

- **Altura de 0.4 m**

Espesor (mm)	4	6	8	10	12	14	16	18
Coeficiente de convección del gas	4.26	2.84	2.13	1.70	3.38	3.32	3.26	3.21
Uref	2.33	1.83	1.5	1.28	2.04	2.02	1.99	1.98
Método Transferencia de calor	Conducción	Conducción	Conducción	Conducción	Convección	Convección	Convección	Convección

Tabla 6. Resultados para diferentes espesores de cavidad con H=0.4 m

- **Altura de 0.8 m**

Espesor (mm)	4	6	8	10	12	14	16	18
Coeficiente de convección del gas	4.26	2.84	2.13	1.70	1.42	3.32	3.20	3.15
Uref	2.16	1.72	1.43	1.22	1.07	1.86	1.85	1.83
Método Transferencia de calor	Conducción	Conducción	Conducción	Conducción	Conducción	Convección	Convección	Convección

Tabla 7. Resultados para diferentes espesores de cavidad con H=0.8 m

En cuanto a la altura, se ha demostrado como influye sobre la convección externa a ambos lados de la ventana, disminuyendo estos parámetros y obteniendo menor transmitancia térmica que en una ventana de 0.4 metros de altura. En cambio, cuando el método de transferencia de calor es el mismo no hace variar el coeficiente de

convección del gas. Debido a las correlaciones encontradas, la altura influye retrasando la convección natural frente a la conducción.

Los cambios en las características térmicas de la ventana en consecuencia a la variación del espesor son evidentes. Cuando se trata de un espesor de cavidad pequeño la transferencia de calor se produce por conducción y si es relativamente más grande comienza a ser notable la convección y se produce un gran cambio en los resultados. Se ha demostrado la relación del espesor de la cavidad con el método por el que se transfiere calor en su interior, que posteriormente será explicado más detalladamente.

El espesor de la cavidad interior rellena de gas, cuyo objetivo es aislar, tiene un significativo efecto en el calor que se pierde a través de la ventana. Por este motivo, debe ser definido un valor óptimo del espesor con el que se minimicen las pérdidas energéticas.

Como se ha podido comprobar, las temperaturas exteriores, condiciones climáticas o la altura de la ventana entre otros muchos factores influyen en los resultados; y para cada situación, el espesor óptimo sería diferente.

Con las condiciones de temperatura consideradas durante este trabajo y una altura de 0.8 m, se grafican los resultados de flujos de calor obtenidos para cada espesor.

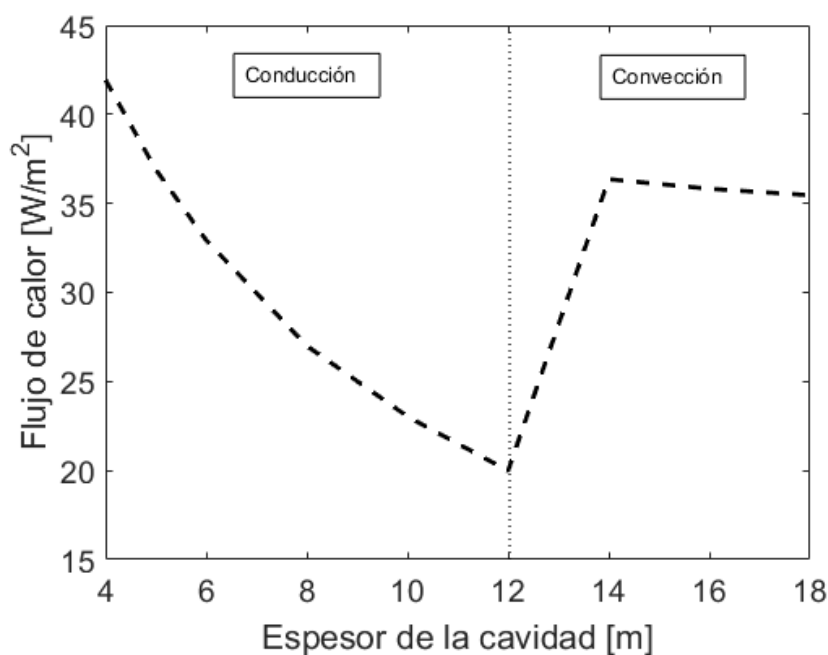


Figura 31. Variación del flujo de calor en función del espesor de la cavidad.

En la figura 31 se observan 2 tendencias a diferenciar:

- La primera de ellas, a medida que aumenta el espesor de la cavidad, siendo este de reducido tamaño, el flujo de calor que se pierde a través de la ventana decrece considerablemente. Esto se debe a la transferencia de calor por **conducción**, ya que a medida que aumenta el espesor a atravesar, la resistencia térmica crece siguiendo la ley de la conducción del calor de Fourier:

$$q'' = -k \times \frac{\partial T}{\partial x}$$

Esta es la zona donde se encuentra el flujo de calor perdido más bajo y, en consecuencia, el espesor óptimo de la cavidad interior. Como ya se ha dicho, el espesor óptimo varía según las condiciones dadas en el problema, pero en este caso concreto se encuentra en el valor de 12 mm.

La diferencia de utilizar un espesor de 4 mm a otro de 12 mm se observa al reducir las pérdidas de calor en un **52.36 %** con el ahorro energético y económico que esto supone.

- En la segunda, el flujo de calor vuelve a aumentar en gran medida, lo que significa que la transferencia por el mecanismo de convección contribuye más que el de conducción. Al aumentar el espesor de la cavidad, el gas tiene más capacidad de movimiento y comienza a realizar ascensiones por la diferencia en su densidad debido a la variación de temperatura entre las dos superficies.

Por lo tanto, sabiendo que la convección presenta peores propiedades térmicas para una ventana, el objetivo es buscar un espesor para el que se transfiera calor por conducción en la cavidad, y cuanto mayor pueda ser este, respetando el mecanismo de conducción, mayor será la resistencia térmica.

Para el caso estudiado el **espesor óptimo es de 12 mm**, pero como ya se ha comentado, este puede variar en función del gas interior o temperaturas ambiente.

5.4.4. Influencia de la calidad del vidrio.

En función de la calidad del vidrio que se utilice en una ventana muestra unas características térmicas u otras, variando la conductividad térmica del mismo. Con ello pueden conseguirse valores de transmitancia térmica diferentes, ya que al reducir la conductividad térmica del vidrio se aumenta la resistencia al paso de calor y se reduce la transmitancia térmica de la ventana.

En este estudio se han comparado los resultados de la ventana variando la conductividad térmica del vidrio, y se ha observado como ocurre lo comentado anteriormente, pero con variaciones muy pequeñas. Por lo tanto, se concluye que no es lo suficientemente influyente en los resultados como para ser estudiado con mayor profundidad.

5.5. Estudio de la condensación.

La condensación en una vivienda se produce principalmente por el aumento de la humedad relativa del ambiente interior, causado por algunos factores como los comentados en el apartado de motivación.

Para el cálculo de la condensación en cerramientos, como es el caso de este trabajo, la temperatura exterior está sujeta a la zona geográfica en la que se encuentre y está regulada por la Norma Básica de Edificación (NBE-CT-79) [29], en la Figuras 32 se muestran el mapa de zonificación de temperaturas mínimas de invierno en España, las cuales se son dadas en la Tabla 8.

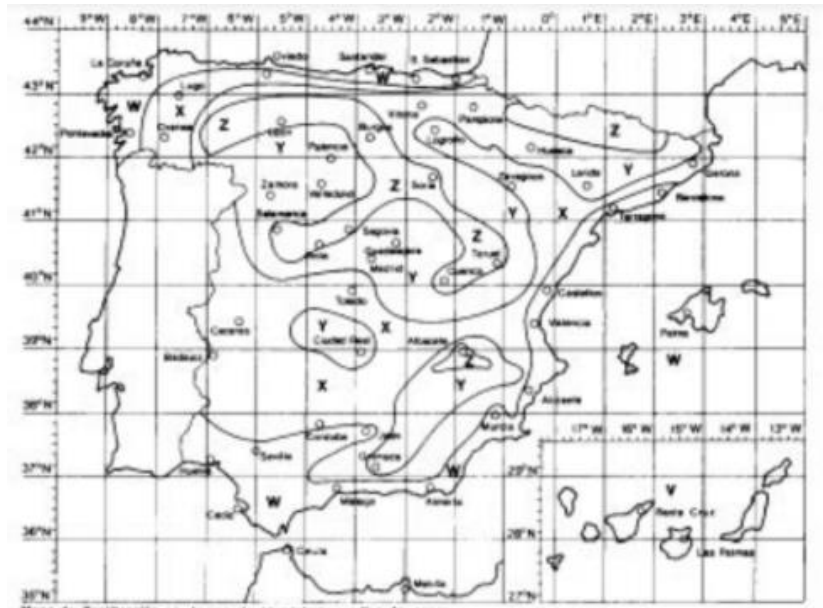


Figura 32. Mapa de zonificación de la temperatura exterior para cálculo de la condensación [29]

Tomando como referencia Madrid para este proyecto, se debe elegir la temperatura para la zona Y del mapa, en la Tabla 8 se puede tomar el valor adecuado a esta zona:

Zona climática mapa	V	W	X	Y	Z
Temperatura exterior para cálculo de condensaciones en °C	10	5	3	0	-2

Tabla 8. Temperatura exterior para el cálculo de la condensación [29].

Para el interior de la vivienda, según **el Reglamento de Instalaciones Térmicas en Viviendas (RITE)** [28], la temperatura óptima se encuentra entre 21°C y 23°C.

Condiciones interiores de diseño		
Estación	Temperatura operativa ° C	Humedad relativa %
Verano	23 .. 25	4560
Invierno	21 .. 23	40.....50

Figura 33. Condiciones de temperaturas de diseño para interior [28]

Las temperaturas correspondientes al interior de la sala y al exterior en la estación de invierno en Madrid (zona Y) son las siguientes:

$$T_i = 22^{\circ}\text{C}$$

$$T_o = 0^{\circ}\text{C}$$

Los resultados con estas condiciones ambientales son:

Resultados	$h_i \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$	$h_o \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$	$h_g \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$	$U_{ref} \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$	$q'' \left[\frac{W}{m^2} \right]$
$T_o = 0^\circ C$ $T_i = 22^\circ C$	7.54	19.45	3.57	2.11	46.46

Tabla 9. Resultados para el cálculo de la condensación.

Se desea conocer también la distribución de temperatura del cristal interior, para saber que zona de la ventana está más expuesta a la condensación del vapor de agua del interior de la vivienda. Mediante la expresión conocida se calculan las temperaturas del cristal interior de la parte que contacta con el argón, son las siguientes:

$$T_{gii} = (16.39; 17.45; 18.14; 18.66; 19.09; 19.45; 19.77; 20.05)$$

Para conocer las temperaturas de la parte en contacto con el aire de la sala, se deben calcular mediante la expresión de transferencia de calor por conducción, utilizando el flujo de calor calculado, la conductividad del vidrio y la temperatura interior comentada anteriormente se llega a los resultados siguientes:

$$q'' = \frac{kv}{ev} \times (T_{gi} - T_{gii})$$

$$T_{gi} = (16.62; 17.68; 18.37; 18.89; 19.32; 19.68; 20.00; 20.28)$$

Una vez conocidas las temperaturas de la ventana, se debe saber cuál es el límite para que se produzca condensación en la parte interior de la ventana.

En los resultados respectivos a este apartado, se han seguido las indicaciones del RITE [28] para los datos a utilizar. Con la temperatura interior de $22^\circ C$ y la humedad relativa del 40% como así se indica para invierno, se quiere demostrar si se produce condensación en el cristal interior de la vivienda.

Para que se produzca el fenómeno de la condensación, la temperatura de la superficie de la ventana debe ser menor a la de saturación del aire húmedo. Para conocer la temperatura a la que se satura el aire se utiliza un diagrama psicrométrico:

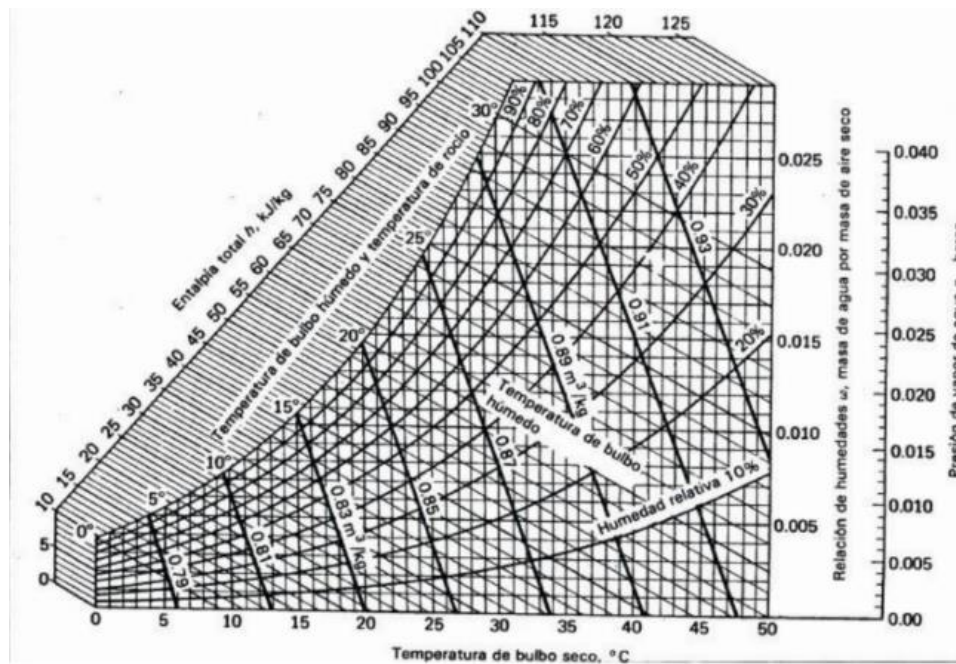


Figura 34. Diagrama psicrométrico [17]

Con una temperatura de bulbo seco de 22°C de la cual se parte en la zona inferior del diagrama, se sube verticalmente hasta la línea que indica una humedad relativa del 40%. Donde intersecan se continúa con una línea paralela a las diagonales que indican la temperatura de bulbo húmedo.

Con las condiciones descritas y siguiendo los pasos anteriores, la temperatura de bulbo húmedo, la cual coincide con la de saturación a la presión atmosférica, es la siguiente:

$$T_{bh} = T_{sat} = 14^{\circ}\text{C}$$

La temperatura de la superficie debe ser menor que dicho valor para que se produzca condensación, como ya se ha mostrado la distribución de temperaturas de la superficie se podría conocer si es posible hallar condensación en el cristal interior.

Como se ha podido demostrar, siguiendo las condiciones descritas por el RITE, no se produce condensación en la ventana ya que son valores dados con tal fin. Pero con otros valores de humedad relativa y temperatura puede llegar a ocurrir.

Cuando no se consiguen las condiciones óptimas y comienza a formarse las gotas a partir del vapor de agua del ambiente, se podrá conocer la temperatura longitudinal de la superficie de la ventana para saber si llega a condensar sobre ella y qué zona será la afectada, sabiendo que la inferior es la primera en presentar las condiciones térmicas necesarias para que se inicie el proceso de cambio de fase.

6. Entorno socio económico.

6.1. Presupuesto.

1. **Autor:** Jorge Muñoz Gómez
2. **Departamento:** Ingeniería térmica y de fluidos

3. Descripción del proyecto

3.1 Título: Estudio y análisis de la transferencia de calor en una ventana con cavidad interior

3.2 Duración: 6 meses

3.3 Presupuesto total: 24792 €

4. Desglose presupuestario

GASTO EN PERSONAL	Nombre y Apellidos	Uds. (horas)	Coste unitario (€/hora)	Coste Total (€)
Ingeniero Senior	Luis Miguel García Gutiérrez	30	150	4500
Ingeniero Junior	Jorge Muñoz Gómez	300	40	12000
PRESUPUESTO TOTAL DE PERSONAL				16500 €

Tabla 10. Presupuesto de personal.

GASTO EN EQUIPOS INFORMÁTICOS	Unidades	Coste Total (€)	Dedicación (meses)	Coefficiente máximo de amortización	Coste imputable
Ordenadores	3	2000	6	26%	520 €
Licencia de Matlab	2	14000	6	26%	3640 €
PRESUPUESTO TOTAL DE EQUIPOS					4160 €

Tabla 11. Presupuesto de equipos y licencias informáticas

5. Resumen de costes

	Coste Total
Personal	16500 €
Equipos	4160 €
Subcontratación de tareas	0 €
Costes indirectos (20%)	4132 €
PRESUPUESTO TOTAL	24792 €

Tabla 12. Resumen presupuestario

El presupuesto total es de VEINTICUATROMIL SETECIENTOS NOVENTA Y DOS EUROS.

6.2. Impacto socio económico

Tras la realización del trabajo se estudia el impacto económico, social, medioambiental y ético del mismo.

El programa desarrollado puede resultar de utilidad si se desea calcular la energía perdida a través de la ventana y permite la comparación entre distintas posibilidades para conocer la opción más adecuada a cada situación. Conocido el flujo de calor que

sale de la vivienda a través de la ventana se puede conocer el gasto económico que supondría esa pérdida si se desea mantener el habitáculo a una temperatura determinada, o cómo de ventajoso puede resultar un modelo utilizado frente a otro.

Suponiendo la ventana estudiada en el trabajo, donde el flujo de calor perdido es $36.78 \frac{W}{m^2}$ durante 10 horas al día en un mes de invierno, la energía perdida al mes es:

$$36.78 \frac{W}{m^2} \times 10 \frac{horas}{día} \times 30 \frac{días}{mes} = 11.034 \frac{kWh}{m^2 \times mes}$$

Si el coste medio de la energía en los meses de 2017 es de 0.1167 €/kWh [27], el coste que supone dicho calor perdido es:

$$Coste = 11.034 \frac{kWh}{m^2 \times mes} \times 0.1167 \frac{€}{kWh} = 1.287 \frac{€}{m^2 \times mes}$$

Por lo tanto, las pérdidas económicas debidas al calor perdido a través del acristalamiento de una ventana con argón en su interior y una configuración 4-12-4 son de un valor de 1.287 euros en un mes de invierno por cada metro cuadrado de ventana.

Con la utilización de ventanas térmicamente más ventajosas, que presentan menor transmitancia térmica, se contribuye a la reducción en emisiones de gases de efecto invernadero como el CO₂. Conocida la energía perdida por la ventana, se puede calcular la cantidad de CO₂ que supone el flujo de calor dado. Suponiendo una caldera para calefacción de gas natural y un coeficiente de emisiones de 0.202 [25], el CO₂ emitido al ambiente es:

$$Emisión CO_2 = 11.034 \frac{kWh}{m^2 \times mes} \times 0.202 \frac{kg CO_2}{kWh} = 2.2288 \frac{kg CO_2}{m^2 \times mes}$$

Finalmente, otra de las ventajas sociales del trabajo es la predicción de la condensación conociendo las temperaturas interiores y exteriores y las características de la ventana. Permite conocer la temperatura de la superficie del cristal interior para saber si es menor que la de saturación del ambiente y poder predecir si el vapor de agua interior puede condensar sobre dicha superficie.

7. Conclusiones y trabajos futuros.

Los objetivos del trabajo eran comprobar el estudio bibliográfico sobre la transferencia de calor en una ventana con cavidad interior y validar los resultados obtenidos con dicho modelo y sus medidas experimentales. Posteriormente, se utiliza la solución anterior para conocer las características aislantes de ciertos parámetros como el gas enclaustrado en la cavidad o la configuración de espesores mediante la variación de estos. Se finaliza con ciertas comparaciones entre el modelo principal validado y sus variaciones para conocer la opción más adecuada en cada caso tratado.

La primera conclusión obtenida es la validez del modelo seguido a lo largo del trabajo, ya que los resultados se asemejan a las medidas experimentales dadas en estudios anteriores, probando que la temperatura crece longitudinalmente a lo largo de la ventana debido al efecto de convección natural del gas interior.

Tras conocer la influencia de distintos parámetros sobre el modelo principal, se concluye:

- La configuración de espesores considerada como óptima bajo las condiciones externas impuestas por normativas es **4-12-4**. Aunque existen espesores de 6 mm para el vidrio, no supondría un ahorro energético significativo a pesar de ser de un coste económico mayor. La cavidad del gas de 12 mm posee mayor resistencia térmica ante el paso de calor que los demás espesores estudiados debido a la transferencia por conducción.
- Ante la elección del gas que ocupa la cavidad del doble acristalamiento se presentan varias posibilidades de diferentes propiedades térmicas. Tras haber estudiado la ventana con argón, aire, nitrógeno y xenón, se esclarece que la opción más aislante debido a su baja conductividad es aquella que contiene **xenón** en su interior.
- Se ha demostrado como varía la transmitancia térmica de la ventana en función de las condiciones tanto exterior como interior. La temperatura del ambiente es determinante para conocer la capacidad aislante de la ventana y la posibilidad de que condense el vapor de agua interior. A menor temperatura exterior, mayor es

el flujo de calor perdido y se debería tomar una opción más resistente al paso del calor, es decir, el vidrio y el gas que menor transmitancia térmica presenten.

- La altura hace variar los coeficientes de convección en los exteriores de la ventana, pero no así el del gas en la cavidad interior. Una altura mayor supone menor transmitancia térmica y con ello menor flujo de calor perdido. Por lo tanto, la ventana con **0.8 m de altura** posee mejores propiedades térmicas.

Para poder completar y seguir trabajando sobre el tema tratado se proponen **trabajos futuros** sobre la transferencia de calor en una ventana de cavidad interior.

Uno de los parámetros a considerar para trabajos futuros es la radiación, ya que no se ha tenido en cuenta en la transferencia de calor estudiada y es un parámetro importante, como por ejemplo en el caso estudiado de verano. Al igual que la emisividad del vidrio, es una de las propiedades que aportan los fabricantes y puede influenciar sobre la transmitancia térmica del mismo.

Hoy en día, se investiga sobre mejora de la calidad del vidrio y su capacidad aislante, existen diferentes vidrios con tratamientos térmicos o aditivos que presentan propiedades térmicas diferentes, en función de cual se utilice, los resultados se verán modificados.

Además de lo comentado anteriormente, el marco puede ser importante en la pérdida de calor, existen diferentes materiales de los que hacer un marco de ventana, como madera, PVC o aluminio, en función del que sea elegido, el flujo de calor variará.

La comparativa térmica entre los distintos gases a estudiar puede ser complementada con un análisis económico del uso de los mismo, pues a pesar de presentar mejores propiedades aislantes su coste puede ser tan elevado que no resulte rentable la inversión.

El gasto económico al que equivale el flujo de calor perdido por la ventana no es de gran magnitud, pues solo supone $1.287 \frac{\text{€}}{\text{m}^2 \times \text{mes}}$. Pero se debe considerar el número de ventanas de una vivienda y su tamaño, ya que el gasto se puede incrementar considerablemente. Por lo tanto, el cambio de una ventana con ciertas características térmicas por otra que presenta mejores propiedades aislantes puede resultar ventajoso con el tiempo.

Al igual que el gasto económico, se ha realizado el cálculo de las emisiones de CO₂ debido a la pérdida de calor de la vivienda. Una configuración apropiada con los materiales adecuados, reducirían en gran medida los gases contaminantes debido al calor perdido.

Finalmente, se podría mejorar la exactitud de los cálculos y la transición entre la conducción y la convección en la cavidad mediante nuevas correlaciones que se ajusten a cada caso estudiado.

8. Referencias

- [1] A. Bejan, *Convection Heat Transfer*, Carolina del Norte: John Wiley & sons, 1993.
- [2] O. Aydin, «Conjugate heat transfer analysis of a double pane windows.,» *Elsevier*, nº 41, pp. 109-116, 2005.
- [3] O. Aydin, «Determination of optimum air layer thickness in double pane windows,» *Energy and Buildings*, vol. 32, pp. 303-308, 2000.
- [4] W. S. Janna, *Engineering heat transfer*, Oklahoma: Taylor & Francis Group, 2009.
- [5] F. P. Incropera y D. P. Dewitt, *Fundamentos de transferencia de calor*, México: Pearson Educación, 1999.
- [6] N. Abodahab y T. Muneer, «Free convection analysis of a window cavity and its longitudinal temperature profile,» *Pergamon*, vol. 39, nº 3/4, pp. 257-267, 1998.
- [7] O. G. Martynenko y P. P. Khramtsov, *Free-Convective Heat Transfer*, Berlín: Springer, 2005.
- [8] W. M. Rohsenow, J. P. Hartnett y Y. I. Cho, *Handbook of Heat Transfer*, Nueva York: McGraw-Hill, 1998.
- [9] G. Nellis y S. Klein, *Heat Transfer*, Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [10] «Infraspection Institute,» [En línea]. Available: <https://www.infraspection.com/>. [Último acceso: Agosto 2017].
- [11] IDAE y ATECYR, «Instalaciones de climatización con equipos autónomos,» Junio 2012. [En línea]. Available: http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_17_Guia_tecnica_instalaciones_de_climatizacion_con_equipos_autonomos_5bd3407b.pdf. [Último acceso: Agosto 2017].
- [12] Aemet. [En línea]. Available: http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/efemerides_extremos. [Último acceso: Septiembre 2017].

- [13] IDAE, «Soluciones de Aislamiento con Vidrios y Cerramientos,» Noviembre 2007. [En línea]. Available: http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_GUIA_TECNICA_Vidrios_y_cerramiento_v05_2dfc482b.pdf. [Último acceso: Agosto 2017].
- [14] CoolProp. [En línea]. Available: <http://www.coolprop.org/coolprop/HighLevelAPI.html#propssi-function>. [Último acceso: Julio 2017].
- [15] «Gas encyclopedia,» Air Liquide, [En línea]. Available: <https://encyclopedia.airliquide.com/xenon>. [Último acceso: Julio 2017].
- [16] «Véntur,» [En línea]. Available: <http://venturlevante.com/cristal-inteligente-tecnologia-lamiglass/>. [Último acceso: Agosto 2017].
- [17] Universidad Carlos III de Madrid, *Apuntes de Transferencia de Calor*, Madrid, 2015.
- [18] «Goteras,» [En línea]. Available: <http://goteras.info/condensacion-ventanas>. [Último acceso: Agosto 2017].
- [19] «SciELO,» [En línea]. Available: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642011000300005. [Último acceso: Agosto 2017].
- [20] «Reología de los fluidos,» [En línea]. Available: <https://reologiadelosalimentos.wordpress.com/>. [Último acceso: Agosto 2017].
- [21] «Transferencia de calor y termodinámica,» [En línea]. Available: <http://aprendiendoingenieriaquimica.blogspot.com.es/2016/02/fundamentos-de-la-conveccion.html>. [Último acceso: Agosto 2017].
- [22] Instituto de Estadística, «IE,» [En línea]. Available: <http://www.madrid.org/iestadis/fijas/coyuntu/otros/cltempe.htm>. [Último acceso: Agosto 2017].
- [23] Y. A. Çengel , *Transferencia de calor y masa*, McGraw-Hill, 2011.
- [24] M. A. Boles y Y. A. Çengel, *Termodinámica*, México D.F.: McGrawHill, 2009.

- [25] Ministerio de Industria, Energía y Turismo y IDAE, «Factores de emisión,» Julio 2017. [En línea]. Available: http://www.mapama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/factores_emision_tcm7-359395.pdf. [Último acceso: Septiembre 2017].
- [26] Matlab, «Precios y licencias» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/pricing-licensing.html>. [Último acceso: Septiembre 2017].
- [27] Red Eléctrica de España, «Término de facturación de energía activa» 2017. [En línea]. Available: https://www.esios.ree.es/es/analisis/1013?vis=1&start_date=01-01-2017T00%3A00&end_date=31-12-2017T23%3A50&compare_start_date=01-01-2016T00%3A00&groupby=year. [Último acceso: Septiembre 2017].
- [28] Ministerio de Industria Energía y Turismo, «Reglamento de las Instalaciones Térmicas en los Edificios,» 2013.
- [29] «Norma Básica de la Edificación NBE-CT-79,» 1979.
- [30] «Código Técnico de la Edificación,» 2006.

9. Anexos

A.1 Obtención de los coeficientes de convección y distribución de temperatura para Flujo de calor constante y Temperatura de la superficie uniforme.

```
% Estudio y análisis de la transferencia de calor
% en una ventana con cavidad interior

% Inputs

g = 9.81; %gravedad
To = 4+273; %Temperatura del ambiente exterior
Ti = 22+273; %Temperatura del ambiente interior
ec = 4e-3; %espesor cristal (m)
H = 0.4; %altura ventana (m)
ev = 12e-3; %espesor cavidad que contiene Argón (m)
kc = 0.8; % conductividad térmica cristal (W/mK)

% valores iniciales de la iteración

hi = 8.3; %coeficiente de convección interior (W/Km^2)
ho = 16.7; %coeficiente de convección exterior (W/Km^2)
Uref = 2.14; %Transmitancia térmica de la ventana (W/Km^2)
Rtot = 1/Uref; %Resistencia térmica de la ventana (Km^2/W)
hg = (Rtot-1/hi-1/ho-2*ec/kc)^-1;%coeficiente de convección en la
cavidad

tol = 0.05; % tolerancia para finalizar el proceso iterativo
Tgi = 273+10; Tgo = 273+10; %Tª de la parte exterior de los cristales
Tgi1 = 273+0; Tgo1 = 273+0;
cont = 0; %contador del número de iteraciones

%TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE CONSTANTE

while abs(Tgi1-Tgi)>tol && abs(Tgo1-Tgo)>tol

    Rtot = 1/hi + 1/ho + 1/hg + 2*ec/kc;
    q = (Ti-To)/Rtot;
    cont = cont +1;

    % Zona interior: Convección libre con flujo externo sobre pared
    vertical

    Tgi = Ti-q/hi;
    Tfi = (Tgi+Ti)/2;

    %Propiedades del Aire a la temperatura media 'Tfi'

    mui = CoolProp.PropsSI('V','P',101325,'T',Tfi,'Air');
    rhoi = CoolProp.PropsSI('D','P',101325,'T',Tfi,'Air');
    ki =
CoolProp.PropsSI('CONDUCTIVITY','P',101325,'T',Tfi,'Air');
    Cpi = CoolProp.PropsSI('C','P',101325,'T',Tfi,'Air');
```

```

    nui = mui/rhoi;
    alphasai = ki/(rhoi*Cpi);
    betai = 1/(Tfi);
    Pri = nui/alphai;

    Rai = (g*betai*(Ti-Tgi)*H^3)/(alphai*nui); %Número de Rayleigh en
int.

    %Estudio del flujo:

    if (10^4 < Rai) && (Rai <= 10^9) %Laminar
        Ci = 0.59;
        ni = 1/4;
    elseif (10^9 < Rai) && (Rai < 10^13) %Turbulento
        Ci = 0.1;
        ni = 1/3;
    else
        disp('error hi')
        break
    end

    Nui = Ci*Rai^ni;
    hi_natural = Nui*ki/H;

    %Comprobación de convección forzada, natural o mixta

    Gr = (g*betai*H^3*(Ti-Tgi1))/nui;
    vi = 0.15;
    Rei = (rhoi*H*vi)/mui;
    flujo = Gr/Rei;

    if (Rei < 5*10^5) %Régimen laminar

        Nui_forzado = 0.664*Rei^(1/2)*Pri^(1/3);
    end

    hi_forzado = Nui_forzado*ki/H;

    %hi = ((max(hi_forzado,hi_natural))^3 +
    (min(hi_forzado,hi_natural))^3)^1/3;

    %Del libro Heat Transfer pág. 769, se utiliza el signo '+' porque
    los
    %flujos son perpendiculares y el '3' porque ser el valor más
    típico.

    %Si se considera convección natural con el aire paradi en el interior:

    hi = hi_natural;

    % Zona exterior: Convección forzada con flujo externo.

    Tgo = To+q*1/ho;
    Tfo = (Tgo+To)/2;

    %Propiedades del Aire a temperatura Tfo
    muo = CoolProp.PropsSI('V','P',101325,'T',Tfo,'Air');
    rhoo = CoolProp.PropsSI('D','P',101325,'T',Tfo,'Air');

```



```

ko =
CoolProp.PropsSI('CONDUCTIVITY','P',101325,'T',Tfo,'Air');
Cpo = CoolProp.PropsSI('C','P',101325,'T',Tfo,'Air');
PRANDTL0 =
CoolProp.PropsSI('PRANDTL','P',101325,'T',Tfo,'Air');
nuo = muo/rhoo;
alphao = ko/(rhoo*Cpo);
betao = 1/(Tfo);
Pro = nuo/alphao;
vo = 7.22; %Velocidad del viento en el exterior.

% comportamiento del flujo (turbulento, laminar o mixto)

Re = rhoo*H*vo/muo; %Número Reynolds en el exterior de la ventana.

if (Re < 5*10^5) %Régimen laminar

    Nuol = 0.664*Re^(1/2)*Pro^(1/3);

elseif (Re > 5*10^5) && (Re < 10^7) %Condiciones mixtas

    Nuol = (0.037*Re^(4/5)-871)*Pro^(1/3);

elseif (Re > 10^7) %Régimen turbulento

    Nuol = 0.037*Re^(4/5)*Pro^(1/3);

else
    disp('error ho')
    break
end

ho = Nuol*ko/H;

% Convección libre en cavidad

Rtc = ec/kc;
Tgii = Tgi-q*Rtc; %Temperatura del cristal interior en la cavidad
Tgoi = Tgo+q*Rtc; %Temperatura del cristal exterior en la cavidad
Tfg = (Tgii+Tgoi)/2; %Temperatura media en el interior de la cavidad

%Propiedades del Argón a temperatura Tfg

mug = CoolProp.PropsSI('V','P',101325,'T',Tfg,'Argon');
rhog = CoolProp.PropsSI('D','P',101325,'T',Tfg,'Argon');
kg =
CoolProp.PropsSI('CONDUCTIVITY','P',101325,'T',Tfg,'Argon');
Cpg = CoolProp.PropsSI('C','P',101325,'T',Tfg,'Argon');
PRANDTLg =
CoolProp.PropsSI('PRANDTL','P',101325,'T',Tfg,'Argon');
nug = mug/rhog;
alphag = kg/(rhog*Cpg);
betag = 1/(Tfg);
Prg = nug/alphag;

x = H/ev;
Rag_ev = (g*betag*(Tgii-Tgoi)*ev^3)/(alphag*nug); %Rayleigh en
función del espesor

```

```

Rag_H = (g*betag*(Tgii-Tgoi)*H^3)/(alphag*nug); %Rayleigh en función
de la altura
cg1 = Rag_ev*Prg/(0.2+Prg);

%Del libro 'Incropera' se utilizan las siguientes correlaciones

%Conducción
if (Rag_ev < 10^3) || (Rag_ev*(ev/H) < 100)
    hg = kg/ev;
    disp('1')
%Razones de orientación (H/ev) bajas (1)
elseif (10^-3 < Prg) && (Prg <
10^5) && (1<H/ev) && (H/ev<2) && (10^3<cg)
    Nug1 = 0.18*cg^0.29;
    hg = Nug1*kg/H;
    disp('2')
%Razones de orientación (H/ev) bajas (2)

elseif (Prg < 10^5) && (2<H/ev) && (H/ev<10) && (10^3 <
Rag_ev) && (Rag_ev < 10^10)
    Nug1 = 0.22*cg^0.28*(H/ev)^-0.25;
    hg = Nug1*kg/H;
    disp('3')
%Razones de orientación (H/ev) altas (1)

elseif (1 < Prg) && (Prg < 20) && (10<H/ev) && (H/ev<40) && (10^6 <
Rag_ev) && (Rag_ev < 10^9)
    Nug1 = 0.046*Rag^(1/3);
    hg = Nug1*kg/H;
    disp('4')
%Razones de orientación (H/ev) altas (2)

elseif (1 < Prg) && (Prg < 10^4) && (10<H/ev) && (H/ev<40) && (10^4 <
Rag_ev) && (Rag_ev < 10^7)
    Nug1 = 0.042*Rag_H^(1/4)*Pr^0.012*(H/ev)^-0.3;
    hg= Nug1*kg/H;
    disp('5')

% Del libro "Convection Heat Transfer" de A. Bejan se utilizan
% las siguientes correlaciones
% Éstas solo se pueden utilizar para H/ev > 1, como es el caso de
las ventanas

% (1) Berkovsky and Polevikov para temperatura uniforme

elseif (10^-3 < Prg) && (Prg <
10^5) && (1<H/ev) && (H/ev<2) && (10^3<cg2)
    Nug1 = 0.18*(cg2^0.29)*(ev/H)^-0.13;
    hg = Nug1*kg/H;
    disp('6')

% (2) Berkovsky and Polevikov para temperatura uniforme

elseif (Prg < 10^5) && (2<H/ev) && (H/ev<10) && (10^3 <
Rag_H) && (Rag_H < 10^13)
    Nug1 = 0.22*(cg2^0.28)*(ev/H)^0.09;
    hg = Nug1*kg/H;
    disp('7')

```

```
% (3)

elseif ((ev/H)*Rag_H^(1/4)>5)
    Nug1 = 0.364*Rag_H^(1/4)*(ev/H);
    hg = Nug1*kg/H;
    disp('8')

% Del libro free convective heat transfer

% (1) distribución de temperaturas uniforme con conducción

elseif ((H/ev > 1)&&(Rag_ev*(ev/H) < 100)) %&&(Prg > 1)
    Nug1 = 1+ (Rag_ev^2)*10^-6*(0.8/((x^2)+21*(x^-
3))+10/((x^2)+2^10*(x^-1)));
    hg = Nug1*kg/H;
    disp('9')

else
    disp('error hg')
    break

end

Rtot1 = 1/hi + 1/ho + 1/hg + 2*ec/kc;

q1 = (Ti-To)/Rtot1;

Uref1 = Rtot1^-1;

Tgi1 = Ti - q1*1/hi;

Tgo1 = To + q1*1/ho;

Tm =(Tgi1+Tgo1)/2;

end

% Valores finales de la iteración

hi1 = hi

ho1 = ho

hg1 = hg

%% FLUJO DE CALOR CONSTANTE

% valores iniciales de la iteración
g = 9.81;
To = 4+273;
Ti = 22+273;
ec = 4e-3;
H = 0.4;
```

```

ev = 12e-3;
kc = 0.8;
hi2 = 8.3;
ho2 = 16.7;
Uref2 = 2.14;
Rtot2 = 1/Uref2;
hg2 = (Rtot2-1/hi2-1/ho2-2*ec/kc)^-1;

tol2 = 0.5;
q2 = 20;
q2_f = 10;
cont2 = 0;
Tgi2 = 10;
Tgo2 = 10;

while abs(q2-q2_f)>tol2

    Rtot2 = 1/hi2 + 1/ho2 + 1/hg2 + 2*ec/kc;
    q2 = (Ti-To)/ Rtot2;
    Tgi2 = Ti - q2/hi2;
    Tgo2 = To + q2/ho2;
    cont2 = cont2 +1;

% Zona interior: convección natural en flujo externo sobre pared
vertical

    Tfi2 = (Tgi2+Ti)/2;

    %Propiedades del Aire a temperatura Tfi
    mui2 = CoolProp.PropsSI('V','P',101325,'T',Tfi2,'Air');
    rhoi2 = CoolProp.PropsSI('D','P',101325,'T',Tfi2,'Air');
    ki2 =
CoolProp.PropsSI('CONDUCTIVITY','P',101325,'T',Tfi2,'Air');
    Cpi2 = CoolProp.PropsSI('C','P',101325,'T',Tfi2,'Air');
    PRANDTLi2 =
CoolProp.PropsSI('PRANDTL','P',101325,'T',Tfi2,'Air');
    nui2 = mui2/rhoi2;
    alphai2 = ki2/(rhoi2*Cpi2);
    betai2 = 1/(Tfi2);
    Pri2 = nui2/alphai2;

    Rai2 = (g*betai2*(Ti-Tgi2*H/2))*H^3/(alphai2*nui2); %Ra en función
de dif de temperatura en mitad de la ventana

    if (10^4 < Rai2) && (Rai2 <= 10^9)
        Ci2 = 0.59;
        ni2 = 1/4;
    elseif (10^9 < Rai2) && (Rai2 < 10^13)
        Ci2 = 0.1;
        ni2 = 1/3;
    else
        disp('error hi2')
        break
    end

    Nui2 = Ci2*Rai2^ni2;
    hi2 = Nui2*ki2/H;

```

```
% Zona exterior: Convección forzada en flujo externo en pared
vertical

Tfo2 = (Tgo2+To)/2;

%Propiedades del Aire a temperatura Tfo
muo2 = CoolProp.PropsSI('V','P',101325,'T',Tfo2,'Air');
rhoo2 = CoolProp.PropsSI('D','P',101325,'T',Tfo2,'Air');
ko2 =
CoolProp.PropsSI('CONDUCTIVITY','P',101325,'T',Tfo2,'Air');
Cpo2 = CoolProp.PropsSI('C','P',101325,'T',Tfo2,'Air');
PRANDTLo2 =
CoolProp.PropsSI('PRANDTL','P',101325,'T',Tfo2,'Air');
nuo2 = muo2/rho2;
alphao2 = ko2/(rho2*Cpo2);
betao2 = 1/(Tfo2);
Pro2 = nuo2/alphao2;
vo2 = 5.2; %Velocidad del viento en el exterior (CTE)

% comportamiento del flujo (turbulento, laminar o mixto)

Re2 = rho2*H*vo2/muo2; %Número Reynolds en el exterior de la
ventana.

if (Re2 < 5*10^5) %Régimen laminar

    Nuo2 = (0.906*Re2^(1/2))*Pro2^(1/3);

elseif (Re2 > 5*10^5) && (Re2 < 10^7) %Condiciones mixtas

    Nuo2 = (0.039*Re2^(4/5)-755)*Pro2^(1/3);

elseif (Re2 > 10^7) %Régimen turbulento

    Nuo2 = 0.0385*Re2^(4/5)*Pro2^(1/3);

else
    disp('error ho2')
    break
end

ho2 = Nuo2*ko2/H;

% Convección libre en cavidad

Rtc2 = ec/kc;
Tgii2 = Tgi2-q2*Rtc2; %Temperatura del cristal interior en la
cavidad
Tgoi2 = Tgo2+q2*Rtc2; %Temperatura del cristal exterior en la
cavidad
Tfg2 = (Tgii2+Tgoi2)/2;

%Propiedades del Argón a temperatura Tfg
mug2 = CoolProp.PropsSI('V','P',101325,'T',Tfg2,'Argon');
rhog2 = CoolProp.PropsSI('D','P',101325,'T',Tfg2,'Argon');
kg2 =
CoolProp.PropsSI('CONDUCTIVITY','P',101325,'T',Tfg2,'Argon');
Cpg2 = CoolProp.PropsSI('C','P',101325,'T',Tfg2,'Argon');
```

```

PRANDTLg2 =
CoolProp.PropsSI('PRANDTL','P',101325,'T',Tfg2,'Argon');
nug2 = mug2/rhog2;
alphag2 = kg2/(rhog2*Cpg2);
betag2 = 1/(Tfg2);
Prg2 = nug2/alphag2;

x = H/ev;
Rag_H2 = (g*q2*betag2*H.^4)/(alphag2*nug2*kg2);
Rag_ev2 = (g*betag2*q2*ev^4)/(alphag2*nug2*kg2);
cg2 = Rag_H2*Prg2/(0.2+Prg2);

% Para flujo de calor uniforme

if (Prg2 < 1) %Libro A. Bejan

    Nug2 = 0.34*(Rag_H2^(2/9))*(H/ev)^(1/9);
    hg2 = Nug2*kg2/H;
    disp('1')
elseif ((H/ev > 1) && (H/ev < 40) && (Prg2 > 1) && (Rag_ev2
> 10^4) && (Rag_ev2 <10^7))

    Nug2 = 0.042*(Prg2^0.012)*((ev/H)^0.3)*(Rag_ev2)^0.25 ;
    hg2 = Nug2*kg2/H;
    disp('2')
elseif ((H/ev > 1) && (H/ev < 40) && (Prg2 > 1) && (Prg2 <
20) && (Rag_ev2 > 10^6) && (Rag_ev2 <10^9))

    Nug2 = 0.046*(Rag_ev2)^1/3 ;
    hg2 = Nug2*kg2/H;
    disp('3')

%Conducción

elseif (Rag_ev2 < 10^3) || (Rag_ev2*(ev/H) < 100)

    hg2 = kg2/ev;

else

    disp('error hg2')
break

end

Rtot2_f = 1/hi2 + 1/ho2 + 1/hg2 + 2*ec/kc;

Uref2_f = 1/Rtot2_f

q2_f = (Ti-To)/Rtot2_f

Tgi2_f = Ti-q2_f/hi2;

Tgo2_f = To+q2_f/ho;

Tm2 = (Tgi2_f+Tgo2_f)/2;

end

```

```

hi2_f = hi2

ho2_f = ho2

hg2_f = hg2

%% TEMPERATURA FRENTE A ALTURA

    %Expresión de la temperatura en función de la altura de la
    ventana
Hv = 0.05:0.05:0.4;
c0 = 1.1563;
c1 = -0.31;

T1 = (Tm-
273)+(c0+c1*Uref1)*(q1*Hv/kg).*((g*betag*q1*Prg*Hv.^4)/(alphag*nug*kg)
).^(-0.2)

T2 = (Tm2-
273)+(0.91)*(q2_f*Hv/kg2).*((g*betag2*q2_f*Prg2*Hv.^4)/(alphag2*nug2*k
g2)).^(-0.2)

```

A.2 Obtención y estudio de las constantes c_0 , c_1 y m .

```

% Inputs

Ti = 22+273;
To = 4+273;
hi = 7.5336;
ho = 19.4413;
Uref = 2.0436;
g = 9.81;
ec = 4e-3;
kc = 0.8;
ev = 12e-3;

%Datos termodinámicos calculados

q = Uref*(Ti-To);
Tgi = Ti-q/hi;
Tgo = To+q/ho;

    Rtc = ec/kc;

Tgii = Tgi-q*Rtc;
Tgoi = Tgo+q*Rtc;

Tgf = 0.5*(Tgii+Tgoi);

%Datos del gas a estudiar

```

```

mu = CoolProp.PropsSI('V','P',101325,'T',Tgf,'Argon');
rho = CoolProp.PropsSI('D','P',101325,'T',Tgf,'Argon');
k = CoolProp.PropsSI('CONDUCTIVITY','P',101325,'T',Tgf,'Argon');
Cp = CoolProp.PropsSI('C','P',101325,'T',Tgf,'Argon');

%Datos calculados del gas

nu = mu/rho;
alpha = k/(rho*Cp);
beta = 1/(Tgf);
Pr = nu/alpha;

%Altura de la ventana

H = 0.05:0.025:0.4;
Hv = 0.4;

% OPCIÓN A: Regresión lineal para el cálculo de las constantes c y m.

Ra = (g*q*beta*H.^4)/(alpha*nu*k);
Ra2 = (g*beta*(Tgii-Tgf)*H.^3)/(alpha*nu);
Ra_H = (g*beta*(Tgii-Tgf)*Hv.^3)/(alpha*nu); %En lo más alto de la
ventana
Na = (Tgii-Tgf)*k./(q*H);
Na_H = (Tgii-Tgf)*k/(q*Hv); %En lo más alto de la ventana

        x = log10(Ra2*Pr); %Con Ra2 se ajusta mejor la opcion B pero
la A cambia m a -0.3333
        y = log10(Na);

plot(x,y,'k');
        xlabel('log(Ra*Pr)');
        ylabel('log(Na)');
        set(gca,'FontSize',14)
        ylim([-2 -1.2])
        xlim([5 7])

P = polyfit(x,y,1);

m_A = P (1)
c_A = 10^(P (2))

% OPCIÓN B: Despejar el valor de m con datos del artículo

c_B = 0.91 %Dato copiado de los resultados del artículo

m_B = (y-log10(c_B))/x

        %Crear un vector con distintos valores de c para
        %conocer el análisis de sensibilidad con m

vector_c = 0.2:0.11:2

vector_m = ((log10(Na_H))-log10(vector_c))./(log10(Ra_H*Pr))

```



```

plot(vector_c,vector_m,'k');
    xlabel('pendiente "m"');
    ylabel('ordenada en el origen "c"');

solo                                     %Conocer la dependencia de Uref con c, ya que c
                                     %varía con el tipo de ventana, pues todas las
las                                     %características son comunes excepto Uref, usando
                                     %constantes dadas por el artículo.

vector_Uref = 0.5:0.15:3
c0 = 1.1563;
c1 = -0.31;

c = c0 + c1*vector_Uref

plot(vector_Uref,c,'k');
    xlabel('Uref');
    ylabel('c');
set(gca,'FontSize',14)

                                     %Usando vectores de c y Uref, obtener las
constantes c0                         %y c1 mediante la representación de los puntos en
una                                   %recta

P = polyfit(vector_Uref,vector_c,1);

plot(vector_Uref,vector_c,'k');
    xlabel('Uref');
    ylabel('c');

    c0_2 = P(1)
    c1_2 = P(2)

```

A.3 Comparación entre gases en el interior de la cavidad.

```

%% comparacion entre varios gases

qAIR = 43.56;
qN = 43.45;
qA = 36.76;
qX = 23.33;
hi = 7.5336;
ho = 19.4413;
T = 284.5;
H = 0.4;

```

```

ev = 12e-3;
g = 9.8;
ec = 4e-3;
kc = 0.8;

% hg con ARGON

muA = CoolProp.PropsSI('V','P',101325,'T',T,'Argon');
rhoA = CoolProp.PropsSI('D','P',101325,'T',T,'Argon');
kA =
CoolProp.PropsSI('CONDUCTIVITY','P',101325,'T',T,'Argon');
CpA = CoolProp.PropsSI('C','P',101325,'T',T,'Argon');
nuA = muA/rhoA;
alphaA = kA/(rhoA*CpA);
betaA = 1/(T);
PrA = nuA/alphaA;

Rag_HA = (g*qA*betaA*H.^4)/(alphaA*nuA*kA);
Rag_evA = (g*betaA*qA*ev^4)/(alphaA*nuA*kA);

NugA = 0.34*(Rag_HA^(2/9))*(H/ev)^(1/9);
hgA = NugA*kA/H
R_termicaA=1/hi+1/ho+1/hgA+(2*ec)/kc;
Uref_ARGON=1/R_termicaA

% hg con AIRE

muAIR = CoolProp.PropsSI('V','P',101325,'T',T,'AIR');
rhoAIR = CoolProp.PropsSI('D','P',101325,'T',T,'AIR');
kAIR =
CoolProp.PropsSI('CONDUCTIVITY','P',101325,'T',T,'AIR');
CpAIR = CoolProp.PropsSI('C','P',101325,'T',T,'AIR');
nuAIR = muAIR/rhoAIR;
alphaAIR = kAIR/(rhoAIR*CpAIR);
betaAIR = 1/(T);
PrAIR = nuAIR/alphaAIR;

Rag_HAIR = (g*qAIR*betaAIR*H.^4)/(alphaAIR*nuAIR*kAIR);
Rag_evAIR = (g*betaAIR*qAIR*ev^4)/(alphaAIR*nuAIR*kAIR);

NugAIR = 0.34*(Rag_HAIR^(2/9))*(H/ev)^(1/9);
hgAIR = NugAIR*kAIR/H
R_termicaAIR=1/hi+1/ho+1/hgAIR+(2*ec)/kc;
Uref_AIR=1/R_termicaAIR

% hg con NITRÓGENO

muN = CoolProp.PropsSI('V','P',101325,'T',T,'Nitrogen');
rhoN = CoolProp.PropsSI('D','P',101325,'T',T,'Nitrogen');
kN =
CoolProp.PropsSI('CONDUCTIVITY','P',101325,'T',T,'Nitrogen');
CpN = CoolProp.PropsSI('C','P',101325,'T',T,'Nitrogen');
nuN = muN/rhoN;
alphaN = kN/(rhoN*CpN);
betaN = 1/(T);
PrN = nuN/alphaN;

```

```
Rag_HN = (g*qN*betaN*H.^4) / (alphaN*nuN*kN);
Rag_evN = (g*betaN*qN*ev^4) / (alphaN*nuN*kN);

NugN = 0.34*(Rag_HN^(2/9)) * (H/ev)^(1/9);
hgN = NugN*kN/H
R_termicaN=1/hi+1/ho+1/hgN+(2*ec)/kc;
Uref_N=1/R_termicaN
```

% hg con XENON

```
muX = 2.227E-4;
rhoX = 5.584;
kX = 5.365E-3;
CpX = 1.6029E2;
nuX = muAIR/rhoAIR;
alphaX = kX/(rhoX*CpX);
betaX = 1/(T);
PrX = nuX/alphaX;

Rag_HX = (g*qX*betaX*H.^4) / (alphaX*nuX*kX);
Rag_evX = (g*betaX*qX*ev^4) / (alphaX*nuX*kX);

NugX = 0.34*(Rag_HX^(2/9)) * (H/ev)^(1/9);
hgX= NugX*kX/H
R_termicaX=1/hi+1/ho+1/hgX+(2*ec)/kc;
Uref_XENON=1/R_termicaX
```

%Distribución de temperaturas

```
Hv = 0.05:0.05:0.4;
Tm = 283.76

T1 = (Tm-
273)+(0.91)*(qAIR*Hv/kAIR).*((g*betaAIR*qAIR*PrAIR*Hv.^4)/(alphaAIR*nu
AIR*kAIR)).^(-0.2)
T2 = (Tm-
273)+(0.91)*(qN*Hv/kN).*((g*betaN*qN*PrN*Hv.^4)/(alphaN*nuN*kN)).^(-
0.2)
T3 = (Tm-
273)+(0.91)*(qA*Hv/kA).*((g*betaA*qA*PrA*Hv.^4)/(alphaA*nuA*kA)).^(-
0.2)
T4 = (Tm-
273)+(0.91)*(qX*Hv/kX).*((g*betaX*qX*PrX*Hv.^4)/(alphaX*nuX*kX)).^(-
0.2)
```